

Dr C.W.J. Beenakker



# Biljarten met elektronen

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van  
Bijzonder Hoogleraar in de Theoretische Natuurkunde  
van de Vaste Stof aan de Rijksuniversiteit te Leiden  
op vrijdag 1 februari 1991

Rijks **U**niversiteit **L**eiden



*Mijnheer de Rector Magnificus,  
Zeer Gewaardeerde Toehoorders,*

Miniaturisatie, het sleutelwoord voor de moderne elektronische industrie, heeft al in het verre verleden geleerden geboeid. *Hoeveel engeltjes kunnen dansen op een speldeknop?* Deze twistvraag wordt toegeschreven aan de middeleeuwse scholastici.<sup>1</sup> Ik vermoed dat een engel niet aan de natuurwetten onderworpen is. Dit interessante miniaturisatieprobleem valt daarom buiten mijn leeropdracht als natuurkundige en zal vandaag dan ook onbehandeld moeten blijven. *Hoeveel biljarttafels kan men bespelen op een speldeknop?* Deze moderne variant valt wel geheel binnen het domein van de natuurkundige. Er is inderdaad een vakgebied in de natuurkunde dat zich met zo'n probleem bezighoudt. Dit is het vakgebied van de *mesoscopische fysica*.

We zijn vanouds gewend de natuur in een macroscopische en een microscopische wereld onder te verdelen. De macroscopische wereld bevat de zaken die we met het blote oog kunnen onderscheiden. De microscopische wereld bevat de bouwstenen van de materie, de atomen en molekulen. We weten, dat ze er zijn, maar we kunnen ze zelf niet zien. De mesoscopische wereld zit tussen de microscopische en de macroscopische wereld in. De grenzen zijn niet scherp te trekken, maar kunnen wel ongeveer aangegeven worden. Mesoscopische en macroscopische voorwerpen hebben gemeen, dat ze beide een zeer groot aantal atomen bevatten. Een eerste verschil is, dat het macroscopische voorwerp heel goed beschreven kan worden door de gemiddelde eigenschappen van het materiaal waaruit het vervaardigd is. Het mesoscopische voorwerp, daarentegen, is zo klein dat fluctuaties om het gemiddelde van belang worden. Een tweede verschil is, dat voor het macroscopische voorwerp de wetten van de klassieke mechanica in zeer goede benadering opgaan, terwijl het mesoscopische voorwerp zo

---

<sup>1</sup>In werkelijkheid is zij in deze vorm pas later geformuleerd; zie: M. Fransen, *Archimedes in Bad* (Prometheus, Amsterdam, 1990)

klein is dat deze wetten niet meer gelden. Mesoscopische en microscopische systemen behoren beide tot de wondere wereld van de quantummechanica.

De mesoscopische fysica houdt zich bezig met fundamentele fysische problemen die optreden bij miniaturisatie van een macroscopisch voorwerp. Om U kennis te laten maken met deze tak van wetenschap wil ik vanmiddag één enkel voorbeeld enigszins in detail behandelen.

## **Het miniatuurbiljart**

Stelt U zich eens voor: een biljart, zo klein dat er wel honderd van zouden passen op een speldeknop en dat met zo'n nauwkeurigheid gefabriceerd wordt dat het volledig vlak en glad is. Over dit piepkleine biljart schieten biljartballen met snelheden van honderd kilometer per seconde, botsen daarbij keer op keer volledig elastisch met de banden, voordat ze in één van de pockets verdwijnen. Dit wonderlijke partijtje snooker bestaat. De spelers kunt U vinden in een aantal industriële en universitaire laboratoria, verspreid over de hele wereld, waar onderzoek verricht wordt naar nieuwe mogelijkheden voor verdere miniaturisatie van transistoren.

De biljartballen die ik in gedachte heb, zijn de elektronen. Nu lijkt de beweging van een elektron in een willekeurig stroomdraadje helemaal niet op de rechtlijnige beweging van een biljartbal. Integendeel, de beweging van een elektron wordt wel vergeleken met de waggelende gang van een dronkeman. In de Engelse taal spreekt men van een "random walk". Het zijn de onzuiverheden van het materiaal die de rechtlijnige beweging van het elektron verhinderen. Zulke onzuiverheden verstrooien de elektronen in alle richtingen, zodat de baan van een willekeurig elektron nagenoeg onvoorspelbaar wordt. Zo kun je niet biljarten!

Een maat voor de invloed van onzuiverheden op de beweging van de elektronen is de zogenaamde vrije-weglengte. Dit is de gemiddelde afstand waarover een elektron zich kan voortbewegen

zonder met een onzuiverheid te botsen. De vrije-weglenge is nooit oneindig lang: als een elektron maar ver genoeg gaat, komt het zelfs in het meest zuivere materiaal wel een vuiltje tegen. Maar een oneindige vrije-weglenge is gelukkig niet nodig. Het is voldoende voor ons spel, dat de vrije-weglenge groter is dan de afmeting van het biljart.

Er bestaat een intensieve competitie in de elektronische industrie om de grootste vrije-weglenge te bereiken. Het wereldrecord is in handen van het Philips-Laboratorium in Redhill (Engeland), en zit op 1/10 millimeter.<sup>2</sup> Dat is heel groot als U bedenkt dat de vrije-weglenge in een gewone transistor zo'n duizend keer kleiner is. Om de onzuiverheden in het materiaal te elimineren wordt gebruik gemaakt van een techniek die "moleculaire-bundel-epitaktie" genoemd wordt. Hierbij wordt een vaste stof atoomlaag voor atoomlaag opgebouwd, totdat een vrijwel perfect rooster van atomen verkregen is. Zo'n rooster noemt men een kristal. Daar de kristalgroeier tot op atomaire schaal controle heeft over het groeiproces, heeft hij de mogelijkheid de samenstelling van individuele atoomlagen in het kristal te variëren. Hiervan maakt men gebruik om een biljart voor elektronen te vervaardigen dat niet alleen heel *glad* is (d.w.z. met een grote vrije-weglenge), maar bovendien perfect *vlak*.

De manier waarop dit bereikt wordt, is heel ingenieus. De kristalgroeier varieert de samenstelling van de atoomlagen op zo'n manier dat in het materiaal gallium-arseen een potentiaalput voor elektronen ontstaat. Deze potentiaalput sluit de elektronen op in de richting loodrecht op de atoomlagen, maar belemmert niet hun beweging evenwijdig aan de lagen. Eén wand van de potentiaalput wordt gevormd door het grensvlak tussen het gallium-arseen en de legering aluminium-gallium-arseen. Om deze wand te vormen, vervangt de kristalgroeier abrupt, van de ene atoomlaag op de andere, een gedeelte van het gallium met aluminium.

---

<sup>2</sup>C. T. Foxon, J. J. Harris, D. Hilton, J. Hewett & C. Roberts, *Semiconductor Science and Technology* 4, 582 (1989).

De andere wand van de potentiaalput komt tot stand door de aantrekkende kracht van positief geladen siliciumatomen in het aluminium-gallium-arseen. De breedte van de potentiaalput is slechts enkele tientallen atoomlagen. In zo'n smalle put is de beweging van de elektronen loodrecht op de atoomlagen volledig onderdrukt, omdat de putbreedte veel kleiner is dan de golflengte van de elektronen. Alle beweging vindt dus plaats in het tweedimensionale vlak evenwijdig aan de atoomlagen. Men spreekt van een twee-dimensionaal elektronengas.

Het lijkt een beetje op de roman *Flatland* van de Engelse geestelijke Edwin Abbott. Abbott fantaseerde aan het eind van de vorige eeuw over een wonderlijke wereld waarin men slechts twee dimensies kent. Hij stelde zich die voor als "*a vast sheet of paper, on which straight Lines, Triangles, Squares, Pentagons, Hexagons, and other figures, instead of remaining fixed in their places, move freely about, on or in the surface, but without the power of rising above or sinking below it, very much like shadows*".<sup>3</sup> In een twee-dimensionaal elektronengas wordt deze fantasie na honderd jaar, voor een deel, werkelijkheid.

Zie zo, we hebben het biljartlaken, nu staan we voor de opgave daar een heus biljart van te maken, met goed verende banden en een serie gaten waardoor we de elektronen het biljart in kunnen schieten, en waardoor ze het weer kunnen verlaten. Nu is er het probleem, dat het tweedimensionale elektronengas in het inwendige van het kristal begraven is. Je kunt er dus van buiten niet direkt bij. Gelukkig heeft men hier wat op gevonden. De materialen gallium-arseen en aluminium-gallium-arseen waar het kristal uit bestaat, zijn halfgeleiders. Een kenmerkende eigenschap van een halfgeleider, in tegenstelling tot een metaal, is, dat een elektrisch veld er diep in kan doordringen. Een ruimtelijk begrenst elektrisch veld vormt in het tweedimensionale elektronengas een barrière, die aankomende elektronen volledig elastisch

---

<sup>3</sup>E. A. Abbott, *Flatland*, herdrukt door Dover Publications (New York, 1952); blz. 3-4.

terugkaatst. Zo'n elektrisch veld kan men opwekken via een metalen elektrode bovenop het halfgeleidende kristal. Een onderbreking van de elektrode zorgt voor een gaatje in de barrière. Door gebruik te maken van elektronen-bundel-lithografie kan men elektrodes met gaatjes van minder dan één tiende micron definiëren. Zo verkrijgt je een compleet biljart dat nog geen honderdste millimeter groot is.

## Interfererende biljartballen

De miniaturisatie van het biljart zorgt voor een aantal merkwaardige veranderingen in de regels van het spel. Ik zal U de twee meest in het oog springende noemen. De eerste nieuwe regel volgt uit het *onzekerheidsprincipe*, dat in 1927 door de natuurkundige Werner Heisenberg werd geformuleerd. Het onzekerheidsprincipe stelt, dat het principiële niet mogelijk is met volledige zekerheid zowel de plaats als de snelheid van het elektron vast te leggen. Deze abstracte formulering heeft voor ons biljartspel een heel concrete inhoud. Indien het gaatje waardoor de elektronen in het biljart geschoten worden, kleiner is dan zo'n 5/100 micron, verliest men elke controle over de bewegingsrichting. De richting waarin het elektron het gaatje verlaat is dan zuiver een kwestie van toeval. Een goed gerichte stoot is dus principiële onmogelijk in het miniatuurbiljart. Elke rake stoot blijft een toevalstreffer. Ik wil er met nadruk op wijzen, dat dit geen menselijke beperktheid, maar een natuurwet is. Het feit dat in de natuurwetten, zoals we die nu kennen, een toevalselement zit ingebouwd, is problematisch voor filosofen. Albert Einstein, een tijdgenoot van Heisenberg, heeft diens onzekerheidsprincipe nooit kunnen accepteren. "God dobbelt niet", was zijn bezwaar.

De tweede opvallende nieuwe spelregel in het miniatuurbiljart is een gevolg van het verschijnsel van *interfererende paden*. Bij een gewoon snooker-biljart zijn er soms verschillende manieren om een bal in één van de pockets te schieten. Stelt U zich voor, dat de bal,

om de tegenoverliggende pocket te bereiken, om een obstakel heen moet. De speler kan proberen het obstakel linksom of rechtsom te passeren. Wat hij of zij zal doen, is het pad uitkiezen dat de meeste kans van slagen biedt en het andere pad niet benutten. In het miniatuurbiljart ziet de situatie er heel anders uit. Allereerst is het niet mogelijk om vooraf te bepalen welk pad het elektron zal volgen. Het is opnieuw het onzekerheidsprincipe van Heisenberg dat dit niet toestaat. Alleen de kans dat het obstakel linksom of rechtsom wordt gepasseerd, staat van te voren vast. Volgens de gebruikelijke regels van een kansspel zou men concluderen, dat de totale kans op een raak schot de som is van de twee afzonderlijke kansen op een treffer via het pad linksom en rechtsom. De regel voor het optellen van kansen in het miniatuurbiljart is anders. Ik kan de regel in zijn algemeenheid niet geven zonder formules te gebruiken, maar zal ter illustratie een bijzonder geval noemen. Onder zekere omstandigheden kan de totale kans op een treffer nul zijn. De paden linksom en rechtsom “doven elkaar dan uit”. Men spreekt van *destruktieve interferentie*. Wat een verrassing voor de nietsvermoedende speler van ons spel. Hij ziet de twee paden voor zich naar de tegenoverliggende pocket en hij weet, dat het elektron één van de twee paden zal afleggen. Toch, hoe vaak het schot ook herhaald wordt, de pocket blijft leeg.

Destruktieve interferentie treedt op, als de twee paden een verschil in lengte hebben. Hoe groot dat lengteverschil moet zijn, hangt af van een eigenschap van het elektron die men zijn golflengte noemt. In ons geval is de golflengte ongeveer gelijk aan 50/1000 micron oftewel 50 nanometer. De voorwaarde voor destruktieve interferentie is dan, dat het weglengteverschil tussen het pad linksom en rechtsom een oneven veelvoud van de halve golflengte bedraagt, dus 25 nanometer, 75 nanometer, 125 nanometer enzovoorts. Het is één van de verrassende voorspellingen van de quantummechanica, dat deeltjes zoals een elektron soms de natuur van een golf aannemen. Vandaar het bestaan van de golflengte van een elektron. Om interferentie van paden in het

miniatuurbiljart waar te kunnen nemen, is het essentieel dat de golflengte niet te groot is, in elk geval kleiner dan de afmeting van de pockets. Een echte biljartbal heeft ook een golflengte. Deze is echter zo ontzettend klein, veel kleiner dan de pocket in een standaard snooker-biljart, dat zelfs de professional zich niet om interferentieverschijnselen hoeft te bekommeren.

## Transistoren

U bent nu volleerd in het biljarten met elektronen. Wat doen we met deze vaardigheid? Laten we, om hier achter te komen, eens kijken, wie wereldwijd de spelers zijn. Hier in Nederland wordt een miniatuurbiljart zoals ik U heb beschreven, gefabriceerd in het Natuurkundig Laboratorium van Philips in nauwe samenwerking met de Delftse Technische Universiteit. Elders in Europa gebeurt dat onder andere in het Cavendish-Laboratorium te Cambridge en in het Max-Planck-Instituut te Stuttgart; in de Verenigde Staten in de laboratoria van IBM, AT&T en Bellcore en in Japan in de universiteit van Osaka en in het laboratorium van NTT. Wat deze universitaire en industriële laboratoria gemeen hebben, is, dat het centra zijn voor onderzoek naar nieuwe principes waarop transistoren van de toekomst zouden kunnen gebaseerd.

De transistor is een schakelaar voor elektrische stroom. De transistor vormt de bouwsteen van de chip en staat dus aan de basis van de elektronische industrie. De rode draad in de ontwikkeling van de chip of geïntegreerde schakeling is, in één woord, *miniaturisatie*. In 1958 werd, bij Texas Instruments, de eerste geïntegreerde schakeling gefabriceerd. Deze eerste chip bevatte 1 transistor en had een oppervlak van ongeveer 1 vierkante centimeter. Tien jaar later bevatte een chip op hetzelfde oppervlak enkele honderden transistoren. Momenteel kan zo'n chip zelfs vele miljoenen transistoren bevatten, waarvan de kleinste afmetingen minder dan 1 micron zijn. Het laat zich aanzien dat in de nabije toekomst 1/10 micron gehaald zal worden. Veel kleiner kan

niet, althans niet door eenvoudigweg de schaal van de schakeling te verkleinen. Het schakelprincipe van de transistor dient zelf te veranderen om de afmetingen nog een orde van grootte te kunnen verkleinen.

Een gewone transistor werkt als een kraan. De elektrische stroom wordt onderbroken door, via een elektrisch veld, een barrière voor de elektronen op te werpen zoals het dichtdraaien van een kraan een mechanische barrière voor de waterstroom opwerpt. Een te kleine transistor lijkt op een lekkende kraan: de stroom wordt door het opwerpen van een te kleine barrière niet volledig uitgeschakeld. Je kunt dit probleem op twee manieren te lijf. Door verbeteringen in het ontwerp van de barrière kun je proberen het lek te dichten. Miniaturisatie is dan een *hindernis*. Het alternatief is het principe van de kraan voor de werking van de transistor overboord te gooien en op zoek te gaan naar een schakelprincipe dat des te beter werkt, naarmate de afmetingen kleiner zijn. Miniaturisatie is dan een noodzakelijke *voorwaarde*. Dit alternatief is geen oplossing voor de korte termijn, maar wel één die grensverleggend is.

Het miniatuurbiljart voor elektronen is één van de kandidaten voor een nieuw soort transistor. U herinnert zich het verschijnsel van destructieve interferentie. Dit biedt een mogelijkheid om de elektrische stroom uit te schakelen zonder een barrière te hoeven opwerpen. Twee paden van elektronen die na een weglengteverschil van een halve golflengte samenkomen, doven elkaar uit. De schakelaar staat dan dicht. We kunnen van destructieve naar constructieve interferentie overgaan door het weglengteverschil iets te vergroten tot een hele golflengte. Dan staat de schakelaar open. Interferentie werkt des te beter naarmate de afmetingen steeds kleiner worden. Miniaturisatie is dus, in plaats van een hindernis, een noodzakelijke voorwaarde voor dit schakelprincipe.

Vanwege deze mogelijke toepassing staat biljarten met elektronen ten zeerste in de belangstelling. Natuurkundigen spreken van "ballistische elektronen", kennelijk omdat ze het elektron lie-

ver met een kanonskogel dan met een biljartbal vergelijken. De beweging van het elektron door zo'n gaatje in het miniatuurbiljart heet in het vakjargon "ballistisch transport door een constrictie". Dit specifieke onderwerp staat nummer 7 in de top-tien van onderzoeksgebieden, getiteld: "*The Hottest Fields of 1989*".<sup>4</sup> Deze top-tien wordt jaarlijks samengesteld op basis van de frequentie waarmee bepaalde kernartikelen in het afgelopen jaar geciteerd werden. Ter vergelijking: besmetting met het AIDS-virus door cocaïne-gebruik staat nummer 6 en het gat in de ozonlaag aan de zuidpool staat nummer 8, respectievelijk net boven en net onder het miniatuurbiljart.

Deze top-tien bewijst, dat biljarten met elektronen een *aktueel* onderwerp is. Maar is het onderwerp ook *belangrijk*? Deze vraag stelt, in mijn geval, de Philips-directie, of, in het geval van universitair onderzoek, de minister en uiteindelijk stelt U allen deze vraag, als aandeelhouder of als belastingbetaler. Ik kan deze vraag niet beantwoorden. De moeilijkheid is, dat een nieuwe technologie in de regel tientallen jaren nodig heeft om tot ontwikkeling te komen. De meeste uitvindingen beginnen veelbelovend, maar raken in die lange periode achterhaald. Dat lijkt een verspilling, maar is in feite een normale en gezonde situatie. Mislukte pogingen tot vernieuwing horen essentieel bij het innovatieproces. Ze zijn belangrijk, omdat ze de voedingsbodem zijn, waarin die ene succesvolle nieuwe technologie wortelt. Voor een wetenschapsmanager zou het veel gemakkelijker zijn, als van te voren de route naar de volgende wetenschappelijke of technologische doorbraak kon worden uitgestippeld. Ik vind het één van de charmes van ons vak, dat zo'n aanpak niet werkt. De verrassing hoort bij de natuurkunde. Ik wil U twee voorbeelden geven, ontleend aan het onderzoek dat ik U heb beschreven.

---

<sup>4</sup>Science Watch, maart 1990 (Institute for Scientific Information, Philadelphia).

## Het quantum-puntcontact

Eén van de kandidaten voor een nieuw soort transistor is het *quantum-puntcontact*. Een Philips-octrooi en een uitvinding van mijn collega Henk van Houten tezamen met Bart van Wees van de Delftse Technische Universiteit. Het quantum-puntcontact is een naam voor een gaatje in de wand van het miniatuurbiljart waardoor een stroom van elektronen het biljart kan worden ingeschoten. Een bijzondere naam, omdat het gaatje een bijzondere eigenschap heeft. De elektronenstroom wordt door het aanbrengen van een zeker spanningsverschil opgewekt en kan door de breedte van de opening te variëren, geregeld worden. Hoe breder, des te groter de stroom. De bijzondere eigenschap van het quantum-puntcontact is nu, dat de stroom, bij het verbreden van de opening, niet gelijkmatig toeneemt, maar *stapsgewijs*. De verhouding tussen de stroom en de spanning is het geleidingsvermogen. De stapsgewijze toename van de stroom bij een gegeven spanning heeft tot gevolg, dat het geleidingsvermogen slechts bepaalde discrete waarden kan aannemen. We spreken van de *quantisatie* van het geleidingsvermogen.

Met dit begrip “quantisatie” wordt in de natuurkunde het verschijnsel aangeduid, dat sommige grootheden niet continu te variëren zijn, maar alleen voorkomen als gehele veelvoud van een elementaire hoeveelheid die een “quantum” genoemd wordt. Een schoolvoorbeeld is de quantisatie van de elektrische lading. Het bijbehorende quantum van lading is de lading van één enkel elektron. De ontdekker van het quantum van elektrische lading, de Amerikaan Robert Millikan, kreeg voor zijn werk in 1923 de Nobelprijs voor de natuurkunde. De quantisatie van de magnetische flux, omsloten door een supergeleidende ring, werd in 1950 door Fritz London voorspeld en tien jaren later waargenomen. Het bijbehorende quantum is de zogenaamde konstante van Planck, gedeeld door tweemaal de elektronlading. Omstreeks 1950 werd ook de quantisatie van wervelstromen in superfluïde he-

lium voorspeld door de theoretische natuurkundigen Lars Onsager en Richard Feynman. Een recenter kwantisatieverschijnsel is het quantum-Hall-effekt, in 1980 door de Duitser Klaus von Klitzing ontdekt. Hij ontving hier vijf jaren later de Nobelprijs voor. Bij dit rijtje van vier hoort dan sinds 1987 het quantum-puntcontact. Een selekt gezelschap.

Het quantum van geleidingsvermogen dat bij zowel het quantum-Hall-effekt als het quantum-puntcontact optreedt, is het kwadraat van de elektronlading, gedeeld door de konstante van Planck, corresponderend met een weerstand van 25813 Ohm. Ondanks de overeenkomst tussen deze twee kwantisatieverschijnselen kwam de ontdekking van het gequantiseerde geleidingsvermogen van het quantum-puntcontact als een volslagen verrassing. Het effect werd eind 1987 ontdekt door het Delft-Philips samenwerkingsverband waarover ik U sprak<sup>5</sup> en ongeveer gelijktijdig door een groep onderzoekers in Cambridge.<sup>6</sup> Dat de kwantisatie niet theoretisch voorspeld was, kwam niet omdat de verklaring zo buitengewoon moeilijk was. In hetzelfde artikel waarin de experimentele ontdekking door de Philips-Delft-groep wereldkundig gemaakt werd, kon al een theoretische verklaring worden opgenomen die, met enkele noodzakelijke verfijningen, tot op de dag van vandaag standhoudt. Achteraf is gebleken, dat het effect impliciet was in enkele eerdere theoretische artikelen, evenwel zonder dat de auteurs ervan zich dat gerealiseerd hadden. Zo'n blinde vlek komt vaker voor en illustreert, hoe belangrijk de wisselwerking tussen theorie en experiment voor werkelijke vooruitgang is.

Tot zover dit eerste voorbeeld van een verrassende ontdekking. Bij het quantum-puntcontact hebben we te maken met een toevallige vondst. "Je weet nooit, hoe een koe een haas vangt", zegt

---

<sup>5</sup>B. J. van Wees, H. van Houten, C. W. J. Beenakker, J. G. Williamson, L. P. Kouwenhoven, D. van der Marel & C. T. Foxon, *Physical Review Letters* **60**, 848 (1988).

<sup>6</sup>D. A. Wharam, T. J. Thornton, R. Newbury, M. Pepper, H. Ahmed, J. E. F. Frost, D. G. Hasko, D. C. Peacock, D. A. Ritchie & G. A. C. Jones, *Journal of Physics C* **21**, L209 (1988).

men wel in dit verband. Maar eigenlijk is het woord “toeval” een wat te beperkte omschrijving en is ook de “koe” een niet geheel passende associatie. Wetenschappers die de ontwikkeling van de wetenschap zèlf bestuderen hebben een beter woord gevonden, zij spreken van *serendiptisme*. Volgens van Dale betekent dat woord de “gave om door toeval en intelligentie iets te ontdekken waar men niet naar op zoek was”. Serendiptisme is één wijze waarop de wetenschap op een niet-geplande, verrassende manier voortgang maakt. De *analogie* is een andere wijze. Het gaat dan om een ontdekking in het ene vakgebied, die een analogie in een volledig ander vakgebied heeft en op die manier een onverwachte doorbraak in dat andere vakgebied veroorzaakt. Een vorm van “kruisbestuiving” zou je kunnen zeggen. Mijn tweede voorbeeld betreft zo’n verrassende ontdekking door een analogie.

## Het optisch analogon

Biljarten met elektronen ofwel ballistisch transport is het ene vakgebied, de optica het andere. We vergelijken het quantum-puntcontact met een gaatje in een scherm waarvan we de opening kunnen variëren, te vergelijken met een diafragma in een foto-toestel. Een belangrijke eigenschap van een diafragma is de hoeveelheid licht die het gaatje doorlaat, als we het gedurende een bepaalde belichtingstijd openzetten. We spreken van het doorgelaten vermogen. Het doorgelaten vermogen, gedeeld door het ingestraalde vermogen per eenheid van oppervlak, staat bekend als de werkzame doorsnede van het diafragma.

Beschouw nu het geval, dat het gaatje alzijdig met licht van één enkele kleur belicht wordt. We spreken van diffuse en monochromatische belichting. Als we het gaatje geleidelijk steeds groter maken, zullen we natuurlijk zien, dat er steeds meer licht doorgelaten wordt. Het bijzondere is nu, dat deze toename niet geleidelijk gaat, maar *stapsgewijs*. Stelt U zich dat eens voor: het gaatje wordt een beetje vergroot, maar er komt niet meer licht

door. Dan maken we het nog iets groter en plots neemt de hoeveelheid licht met een stap toe. Verder vergroten van de opening heeft dan geen effect, totdat de volgende stap optreedt. Is dat niet merkwaardig? Niet als je het quantum-puntcontact kent.

Er is een precieze analogie met de stapsgewijze toename van de elektrische stroom door een quantum-puntcontact. Deze analogie voorspelt, dat de werkzame doorsnede van het diafragma slechts diskrete waarden kan aannemen die een veelvoud zijn van het kwadraat van de golflengte van het licht, gedeeld door  $2\pi$ .<sup>7</sup> De voorspelde stapsgewijze toename van het doorgelaten vermogen is onlangs op het Natuurkundig Laboratorium gemeten, voor het geval van een spleetvormige opening.<sup>8</sup> In dit geval is de werkzame doorsnede per eenheid van lengte van de spleet gequantiseerd in veelvouden van een halve golflengte.

U moet bedenken, dat de transmissie van licht door een opening één van de meest klassieke onderwerpen in de optica is. Negentiende-eeuwse natuurkundigen als Fraunhofer, Fresnel en Lord Rayleigh hebben dit probleem uitvoerig onderzocht. Wat is het wonderlijk, dat dit eenvoudige verschijnsel bijna twee eeuwen lang verborgen is gebleven en pas ontdekt is via de omweg van het elektronen-biljart.

---

<sup>7</sup>H. van Houten & C. W. J. Beenakker, artikel in: *Analogies in Optics and Micro-Electronics*, samengesteld door W. van Haeringen & D. Lenstra (Kluwer, Dordrecht, 1990).

<sup>8</sup>E. A. Montie, E. C. Cosman, G. 't Hooft, M. B. van der Mark & C. W. J. Beenakker, artikel ter publikatie aangeboden aan Nature.

*Zeer Gewaardeerde Toehoorders,*

Ik heb getracht U een indruk te geven van een vakgebied in ontwikkeling, de mesoscopische fysica. Welke verrassingen de Natuur in dit gebied nog voor ons verbergt, weet ik niet, maar ik verheug me erop verder op onderzoek te gaan. De exploratie van zo'n uitgestrekt en onontgonnen gebied kan alleen door teamwork succesvol zijn. In de loop van mijn verhaal heb ik al een enkele naam kunnen noemen. Aan het slot gekomen wil ik mijn grote waardering jegens *alle* leden van het team in Eindhoven, in Delft en in Redhill, uitspreken.

Geachte Bestuurders van de Stichting Leids Universiteits-Fonds, Geachte Curatoren van deze leerstoel, ik dank U voor het in mij gestelde vertrouwen. U kunt er van overtuigd zijn, dat ik zal trachten mijn ambt naar best vermogen te vervullen. Tevens gaat mijn dank uit naar al degenen die zich voor mijn benoeming ingespannen hebben, in het bijzonder naar U, Hooggeleerde van Leeuwen.

Geachte Directie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, U stelt mij in de gelegenheid mijn wetenschappelijke onderzoek door deze band met de Leidse Universiteit een extra dimensie te geven. Ik ben U daarvoor zeer erkentelijk.

Hooggeleerde Schuurmans, ik beschouw het als een voorrecht om deel uit te maken van Uw groep op het Natuurkundig Laboratorium. In de afgelopen vijf jaar heb ik er kunnen profiteren van de dagelijkse interactie met experimentatoren, in het bijzonder met U, Hooggewaardeerde van Houten.

Hooggeleerde Mazur, bijna dertig jaar geleden sprak U bij gelegenheid van Uw oratie over "De Ivoren Toren". Ik hoop, dat het U een genoegen doet, dat Uw leerling zich niet in zo'n toren heeft verschanst.

Medewerkers van het Instituut-Lorentz en van de Huygens en Kamerlingh Onnes Laboratoria, velen van U ken ik reeds persoonlijk. Ik zie er verlangend naar uit deze relaties uit te breiden en hoop op een stimulerende samenwerking.

Dames en Heren Studenten, ik heb mij pas na mijn eigen studietijd gerealiseerd wat een boeiend en bruisend vakgebied de theorie van de vast stof is. Ik hoop mijn enthousiasme op velen van U te kunnen overbrengen.

Tot besluit wil ik mijn grote dank betuigen aan mijn ouders, beiden natuurkundigen, die mij waardering voor de wetenschap hebben bijgebracht en mij steeds in mijn studie hebben gestimuleerd; aan mijn vrouw, geen natuurkundige, die mij in evenwicht houdt; en aan de Schepper van de Natuur, die mij de talenten heeft toevertrouwd om haar te onderzoeken.

Ik heb gezegd.