

# Lokalisatie van licht

“de wederopstanding van multiple verstrooiing”

A. Lagendijk, FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica (AMOLF) en Natuurkundig Laboratorium Universiteit van Amsterdam

## Inleiding

Het verschijnsel licht heeft de mens altijd beziggehouden. Voor de grootste onder de fysici was de natuurkunde van het licht altijd een belangrijk onderwerp. Wie kent niet de deeltjes-golf controverse tussen Newton en Huygens? De lichtsnelheid speelt een dermate belangrijke rol in de hedendaagse natuurkunde dat men eigenlijk wel zou kunnen spreken van “lichtfysica”. De tak van de natuurkunde die zich bezig houdt met de studie van licht wordt optica genoemd. Ik denk dat veel fysici in de eind vijftiger jaren de mening toegedaan waren dat de optica een “volwassen” tak van wetenschap was geworden. Volwassenheid betekent ook volgroeid en eigenlijk zou de optica dan ook uitgegroeid zijn. Geen fascinerende ontdekkingen meer. Sommige puzzels moesten nog wel even uitgelegd worden, maar dat was slechts een kwestie van geduld en noeste arbeid. Ik zou nu natuurlijk met veel leedvermaak en gebruik makend van bekende clichés deze historische vergissing aan de kaak kunnen stellen. Ik denk dat het iedereen wel duidelijk zal zijn dat de optica groeit en bloeit en ons altijd weer boeit.

Met de komst van de *laser* (waarom wordt in dit woord de “a” eigenlijk niet als “a” uitgesproken?) is de optica in een gigantische stroomversnelling geraakt. Hele nieuwe gebieden van de optica kwamen van de grond. Voor de zeer hoge intensiteiten kwam het veld op van de *niet-lineaire optica*. Voor de zeer lage intensiteiten bleek het quantum karakter van licht niet meer weg te poetsen: de *quantum optica* kwam

onder het vloerkleed vandaan. Maar ook nieuwe ontdekkingen in andere takken van de natuurkunde blijken grote consequenties voor de optica met zich mee te brengen.

Ik zal het hebben over enkele zeer nieuwe natuurverschijnselen behorend tot het domein van de *lineaire klassieke* optica (kan het nog “saaiere”), verschijnselen die nu al als zeer fundamenteel worden aangemerkt. Het gaat om fenomenen die begrepen kunnen worden met behulp van de Maxwell-vergelijkingen. Met natuurkundige theorieën die dus al een eeuw bekend zijn. Deze verschijnselen hadden dus al veel eerder aangepakt kunnen worden, maar toch is dat niet gebeurd. Waarom niet? Het wachten was blijkbaar op de groei van kennis in een andere discipline nl. die van de fysica van vaste stoffen (de natuurkunde van ijzer, keukenzout en silicium).

## Vastestoffysica

Voor een beter inzicht en een betere situering van de nieuwe ontwikkelingen in de optica, zal ik eerst een zeer korte en subjectieve schets van de geschiedenis van de vastestoffysica geven. Algemeen wordt aangenomen dat de vastestoffysica pas echt goed van de grond gekomen is met de ontdekking van de röntgendiffractie in 1912 door Laue en de eerste kristalstructuurbepaling door Bragg in 1913 (van o.a. keukenzout). Kristalstructuren konden nu in grote getale worden opgehelderd. Dit betekent dat het woord vastestoffysica

voor een zeer lange periode synoniem is geweest met de natuurkunde van kristallen of, zoals de fysicus het zegt, van één-kristallen. De pure symmetrie als vurigste wens. Als gevolg hiervan is de, vaak moeilijke, kunst om kristallen te groeien een wezenlijk onderdeel geweest van de vastestoffysica. Uiteraard heeft men zeer veel geleerd van deze studie van kristallen. Maar als u nu even opkijkt van wat u leest (ook papier is een vaste stof!) en u kijkt om u heen, dan denk ik dat u veel vaste stoffen ziet. Het aantal daarvan in kristallijne vorm is waarschijnlijk veel kleiner en de verzameling van éénkristallen in uw omgeving kon wel eens een lege verzameling zijn. Met andere woorden het begrip vaste stof omvat heel veel meer dan alleen kristallen. Veel andere vormen van vaste stoffen zoals amorfte vaste stoffen en kunststoffen spelen een zeer belangrijke rol en zijn bij lange na niet kristallijn.

Het is pas sinds de laatste twintig jaar dat in de fysica van de verdichte materie de studie van de "troep" in zwang is. Deze activiteit komt onder vele namen zoals het onderzoek aan wanordelijke systemen, "random" systemen, spinglazen, en de studie van lokalisatie, frustratie, percolatie enz.. Volgens P.W. Anderson moet men zelfs spreken van een nieuw paradigma (of dat in de zin van Kuhn is weet ik niet). Het is deze gang van gebeurtenissen met daarin het belang van wanorde die grote uitstraling naar vele andere disciplines heeft. In dit opstel zal ik het hebben over deze uitstraling naar de optica. De nieuwe technologische vindingen op het gebied van de vervaardiging van submicronstructuren is een ander aspect van de vastestoffysica met veel invloed op de optica, denk hierbij aan een vak als *opto-elektronica*. Hier zal ik het echter in het geheel niet over hebben.

In de vastestoffysica speelt de elektrische weerstand of het omgekeerde, de geleidbaarheid, een dominante rol. Deze grootheid spant in de verdichte materie een dynamisch bereik van zeker vijf-en-twintig (!) decaden. In de vastestoffysica worden on-

derzoekers dan ook vaak ingedeeld op basis van deze grootheid: we kennen bij halfgeleiderfysici ik zal nu een kleine uitleiding houden over de theorie van geleiding van elektronen in vaste stoffen. Elektronen worden beschreven met een (quantummechanische) golf functie en in vele gevallen gedraagt deze golf functie zich als een echte golf, compleet met interferentie, buiging en verstrooiing. Een perfect kristal is voor dit elektron gewoon een (driedimensionaal) periodiek tralie of rooster. Het elektron komt dan ook zonder probleem door dit rooster: de geleidbaarheid van het elektron is dan oneindig of anders gezegd de weerstand is nul. In de praktijk blijkt natuurlijk altijd dat de geleidbaarheid eindig is. De eindige geleidbaarheid wordt veroorzaakt doordat het elektron tegen onzuiverheden botst in de vaste stof met als gevolg een afwijking van de baan. Het elektron (of de golf functie die het elektron beschrijft) wordt "verstrooid" aan onregelmatigheden en "onrechtmatigheden" in de vaste stof. Hier komt de analogie met licht om de hoek kijken: verstrooiing is een overbekend fenomeen in de optica. Het hele concept van weerstand kan dan ook geheel met behulp van begrippen uit de optica gedemonstreerd worden. Om deze reden zal ik nu het begrip verstrooiing eens van een fundamentele kant bekijken.

### Verstrooiing

Verstrooiing is een veel voorkomend verschijnsel in de natuur(kunde). Zowel golven als deeltjes kunnen verstrooid worden en als de desbetreffende deeltjes met behulp van de quantummechanica dienen worden te beschreven dan gaat de analogie tussen verstrooiing van deeltjes en golven inderdaad heel diep. Verstrooiing treedt op als in de ruimte waarin de golf zich voortplant een plaatselijke storing optreedt. Als gevolg van deze storing zal de voortplanting van een vlakke golf verstoord worden. Dit betekent dat een gedeelte van de straling in alle richtingen wordt verspreid.

De verstrooide golf heeft een aantal eigen-

schappen, zoals de ruimtelijke verdeling van intensiteit die gerelateerd zijn aan de "structuur" van de lokale storing (de verstrooier). Een experimentator (en hopelijk ook de theoreticus) is geïnteresseerd in deze structuur, een term die in dit geval gezien moet worden als een generieke aanduiding voor eigenschappen zoals dichtheid, atoomstructuur, elektronenstructuur enz. Het verband tussen eigenschappen van een verstrooide golf en de structuur van materie wordt heel vaak gebruikt om opheldering te krijgen t a v. de structuur van het materiaal. Dit soort experimenten wordt uitgevoerd in vele takken van de natuurkunde, en ook de reeds eerder genoemde röntgendiffractie valt hieronder. In het bovengenoemde heb ik stiekem een vereenvoudiging doorgevoerd. De verstrooide golf verliet namelijk ongestoord het preparaat. Het is heel goed mogelijk dat de verstrooide golf nogmaals wordt verstrooid en nogmaals en nogmaals enz. Dit verschijnsel dat multiple of veelvuldige verstrooiing wordt genoemd, bezorgt menig fysicus hoofdbrekens. Het patroon van veelvuldige verstrooiing is vaak zo ingewikkeld dat de structuur van het trefplaatje waarin dit verschijnsel optreedt niet meer kan worden vastgesteld. Toch blijven er in de natuur heel veel situaties over waar het optreden van veelvuldige verstrooiing niet kan worden genegeerd. Overal om ons heen zien we voorbeelden van veelvuldige lichtverstrooiing. Kijk maar naar de wolken, naar wit papier, suikerklontjes, mist enz.. Als men het zo bekijkt dan lijkt het verwaarlozen van multiple verstrooiing meer op het bedrijven van struisvogelpolitiek.

Opvallend bij het waarnemen van extreme vormen van veelvuldige verstrooiing is dat het patroon diffuus wordt. Het lijkt wel of er helemaal geen structuur meer te bekennen is. Het ziet er naar uit dat indien veelvuldige verstrooiing zeer sterk aanwezig is er weinig informatie te halen valt uit het patroon. Een saaie boel. Mijn favoriete uitdrukking hiervoor is "er is geen leven na

de gemiddelde vrije weglengte". De gemiddelde vrije weglengte is de lengte waarover een golf vrij kan lopen voordat hij verstrooid wordt. Indien men de beweging voorstelt als een zig-zag beweging dan is de gemiddelde vrije weglengte zoets als de gemiddelde "zig-zag lengte". Hoe kleiner de gemiddelde vrije weglengte des te meer wordt er veelvuldig verstrooid. Er bestaan acceptabele theorieën die het diffuse patroon van lichtverstrooiing bevredigend beschrijven. Het blijkt dat de voortplanting van licht in dat geval beschreven wordt met behulp van een simpele diffusievergelijking en de propagatie wordt dan gezien als een "willekeurige wandeling" (random walk). Het optreden van diffusie vindt men in alle takken van de natuurkunde. En nu zijn we weer terug bij onze elektronen in vaste stoffen. Het elektron wordt veelvuldig verstrooid in de vaste stof. Het gedrag van een elektron in een wanordelijke potentiaal (zoals de reeds eerder genoemde defecten en onzuiverheden) wordt dan ook heel vaak met een diffusietheorie beschreven. Net zo als licht door opaalglas diffundeert, zo diffundeert het elektron door de vaste stof. We spreken dan ook zowel of de diffusieconstante van licht als over de diffusieconstante van een elektron (vastestoffysici gebruiken vaak de hiermee sterk verbonden grootheid van mobiliteit). Voor het elektron geldt dus dat hoe langer de gemiddelde vrije weglengte (des te groter de diffusieconstante) des te groter is het geleidingsvermogen.

Een cruciale aanname in alle diffusietheorieën van golven is dat de veelvuldig verstrooide golven niet met elkaar interfereren. Deze aanname is gebaseerd op het feit dat het interferentiepatroon zeer grillig is en er dus een willekeurige verdeling van fasen is. Het gemiddelde effect van de interferentie zal dan wel te verwaarlozen zijn. Het is deze aanname over veelvuldige verstrooiing die onder bepaalde omstandigheden radicaal fout is.

### Lokalisatie

Kun je door de wanorde van je trefplaatje of

de wanorde van een vaste stof groter en groter te maken bewerkstelligen dat de gemiddelde vrije weglengten van de projectielen (licht of elektronen) korter en korter worden? Je kunt je dus afvragen of er een limiet is aan de gemiddelde vrije weglengte en aan de diffusieconstante. Of, in andere woorden, gebeurt er iets speciaals als de vrije weglengte korter en korter wordt? Anderson, de goeroe van de vastestoffysica, toonde in zijn klassieke artikel<sup>1</sup> getiteld "On the absence of diffusion in some random lattices" aan dat dat inderdaad het geval is voor een elektron dat beschreven wordt met de Schrödingergolfvergelijking.

Indien de vrije weglengte van het elektron zo klein wordt dat de lengte ervan in de buurt komt van de golflengte van het elektron (gedeeld door  $2\pi$ ) dan treedt er een catastrofe op (of een wonder al naar gelang je gezichtspunt). Deze dramatische verandering in het gedrag van het elektron wordt nu (Anderson) lokalisatie genoemd. Het elektron diffundeert niet meer door de vaste stof, zoals altijd verondersteld werd, maar zit gevangen in een wanordelijke trilholtje.

Het duurde een hele tijd voordat men zich realiseerde dat Anderson lokalisatie een effect is dat wordt veroorzaakt door *interferentie* van veelvuldig *elastisch* verstrooide golven. Het effect is dan ook veel algemener dan lokalisatie in de Schrödingergolfvergelijking. In bijna elke golfvergelijking kan men waarschijnlijk gelokaliseerde oplossingen vinden indien men genoeg wanorde weet aan te brengen ten einde een voldoende korte gemiddelde vrije weglengte teweeg te brengen. Een voor de hand liggende kandidaat is het stelsel vergelijkingen van Maxwell dat elektromagnetische golven beschrijft. Deze vergelijkingen zijn zeer fundamenteel en zeer uitgebreid bestudeerd. De mogelijkheid om van deze vergelijkingen een nieuw soort oplossingen te kunnen waarnemen in de natuur is vanzelfsprekend zeer fascinerend.

De essentie van lokalisatie is als volgt. Stel we beschouwen een mogelijk pad voor

voortplanting van een golf in het medium waarin veelvuldige elastische verstrooiing optreedt. We nemen om te beginnen een bijzonder pad namelijk een pad dat terug komt op de plaats waarvan het vertrok. Onafhankelijk van het feit hoe ingewikkeld dit pad is en hoe vaak er verstrooiing is opgetreden er is altijd een ander pad te vinden dat interfereert met dit pad. te weten hetzelfde pad in omgekeerde volgorde doorlopen [zie figuur 1] Deze twee paden interfereren altijd constructief aangezien de weglengte en dus de fase gelijk is. Als gevolg hiervan is de waarschijnlijkheid om terug te keren op de plaats waar de golf begonnen was groter dan dat je op grond van het diffusiemodel zou verwachten. Deze toename

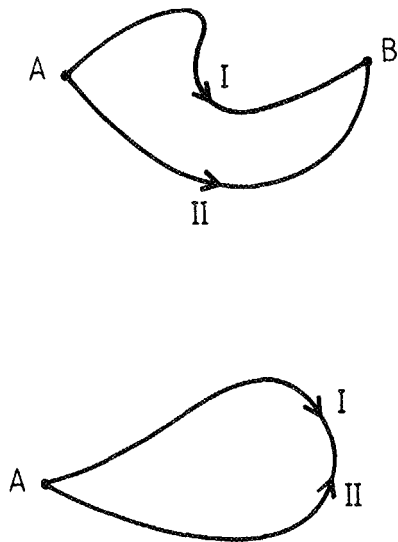


Fig. 1  
 boven: twee willekeurige paden (I en II) om van plaats A naar plaats B te komen in een wanordelijk medium. Interferentie kan zowel destructief als constructief zijn.  
 beneden: een willekeurig pad om van plaats A terug te komen (I) en hetzelfde pad maar dan omgekeerde volgorde doorlopen (II). De interferentie voor deze twee paden is altijd constructief.

in waarschijnlijkheid door constructieve interferentie treedt niet op indien begin- en eindpunt ver uit elkaar liggen. Als de waarschijnlijkheid om op de oude plaats terug te keren groter wordt voor een willekeurige wandeling dan neemt effectief de diffusieconstante van deze wandeling af aangezien de (wortel uit het) gemiddelde (van het kwadraat van de) verplaatsing van de golf minder wordt. Indien je de wanorde steeds maar laat toenemen dan wordt de reductie in de diffusieconstante dus steeds groter, tot op het moment dat de correctie 100% is en de diffusieconstante nul de golf is gelokaliseerd.

Lokalisatie van een golf in een medium uit zich onder andere in de afwezigheid van diffusief transport en het optreden van extreem lage transmissiecoëfficiënten. Voor elektronen betekent dit dat de weerstand zeer sterk wordt beïnvloed door de aanwezigheid van lokalisatie: een soort omgekeerde supergeleiding

Tot voor kort was het idee om lokalisatie voor licht, of andere golven zoals akoestisch golven, te kunnen waarnemen tamelijk academisch. De directe waarneming van een belangrijk ander *interferentie*-effect in *veelvuldige* elastische verstrooiing bracht hierin verandering. De interferentie tussen de twee paden die elkaars tijdsinversen zijn, geldt niet alleen voor paden die zich *in* het medium bevinden maar ook voor paden die *buiten* het materiaal beginnen [zie figuur 2]. Dit zijn precies de paden die in een klassiek verstrooiingsexperiment waargenomen worden: paden die op hun uitgangspunt terugkeren corresponderen in dit geval met terugverstrooiing. De constructieve interferentie zorgt er dus voor dat voor licht er een grotere waarschijnlijkheid is om er aan dezelfde kant weer uit te komen als het erin gegaan is: er zou een toename in de richting van terugverstrooiing moeten plaats vinden als gevolg van interferentie in de veelvuldige verstrooiing. Dit logenstrafte onze verwachting dat er geen structuur zal zijn in het patroon van het veelvuldige verstrooide licht. Meint

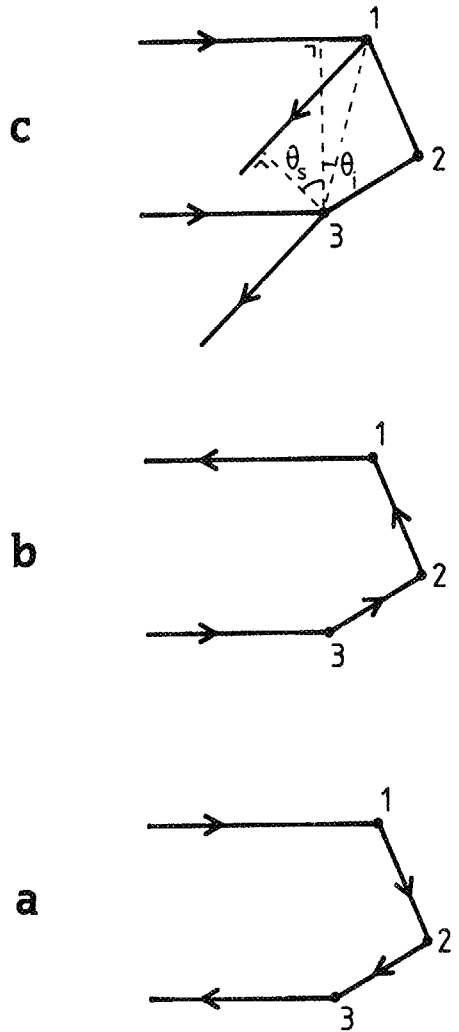


Fig 2

a en b: Schematische voorstelling van een gebeurtenis waarin een binnenkomende golf drie-maal wordt verstrooid en dan precies in de richting van terugstroom naar buiten komt. De twee gebeurtenissen a en b beschrijven hetzelfde verstrooiingspatroon maar dan wel in omgekeerde volgorde doorlopen (123 en 321). Beide uitkomende golven interfereren constructief.

c: Hier wordt aangetoond dat er een faseverschil optreedt tussen beide uitkomende golven (via 123 en via 321) indien de uittree-richting niet precies volgens de richting van exacte terugstroom is.

van Albada, werkzaam in onze groep aan het Natuurkundig Laboratorium van de Universiteit van Amsterdam, was de eerste die deze waarneming van toegenomen terugverstrooiing deed en het in verband bracht met het verschijnsel lokalisatie.<sup>2</sup> In een eenvoudige experimentele opstelling werd de terugverstrooiing gemeten van het licht van een He-Ne laser van een monster bestaande uit een geconcentreerde suspensie van bolletjes van polystyreen in water. In figuur 3 is het experimentele resultaat gepresenteerd van een meting aan een verdunde oplossing van witte verf. In deze figuur wordt de gemeten verstrooide intensiteit uitgezet als functie van de hoek voor hoeken in de buurt van de richting van terugverstrooiing. Let vooral op de kleine schaal van de hoek: het gaat om milliradianen. Er is een zeer duidelijke toename waar te nemen van de intensiteit in de buurt van de richting van terugstrooi. De observatie van de toegenomen terugverstrooiing heeft een belangrijke aanzet gegeven tot een serie van nieuwe experimentele en theoretische studies van het verschijnsel van veelvuldige verstrooiing van licht. Men heeft de naam "zwakke lokalisatie" gegeven aan het effect van toegenomen terugstrooi. Zwakke lokalisatie is het optreden van interferentie tussen twee mogelijke wijzen van voortplanting van een golf die hetzelfde pad doorlopen maar dan wel in tegengestelde richting. Dit geeft aanleiding tot een reductie van de diffusieconstante [zie figuur 1] en tot het optreden van toegenomen terugstrooi van een bundel die er van buiten op gestuurd wordt [zie figuur 2]. Sterke lokalisatie treedt op als het effect op de diffusieconstante zo groot geworden is dat de reductie volledig is: de diffusieconstante is nul.

Het fenomeen van toegenomen terugverstrooiing werd de laatste paar jaar zeer uitgebreid bestudeerd (zie ook bijv. onze publicatie<sup>2</sup>). Vele parameters werden gearbeid om dit geheel nieuwe interferentie-effect te onderzoeken en te beschrijven. men kan hier denken aan parameters zoals

concentratie en afmeting van de strooicentra, golflengte en polarisatie-richting van het licht. In onze groep bouwden Rob Vreeker en Rudolf Sprik zelfs speciaal voor dit project een laser die ultrakorte lichtflitsen geeft (50 femtoseconden) om het verschijnsel van de interferentie tussen de twee omloop-richtingen te kunnen volgen als functie van de lengte van het pad (hoe langer het pad hoe langer het licht erover doet om het te doorlopen).

Hoe dicht is men nu bij het waarnemen van het verschijnsel "sterke" lokalisatie? Men is er heel dichtbij (misschien slechts een factor drie in gemiddelde vrije weglengte), maar er zijn een aantal zeer fundamentele (dus interessante) complicaties. Om er een paar te noemen: a) In de limiet van grote golflengten wordt de verstrooiingsintensiteit gegeven door de wet van Rayleigh, die een omgekeerde evenredigheid met de vierde macht van de golflengte inhoudt. Er wordt dus steeds minder verstrooid bij lan-

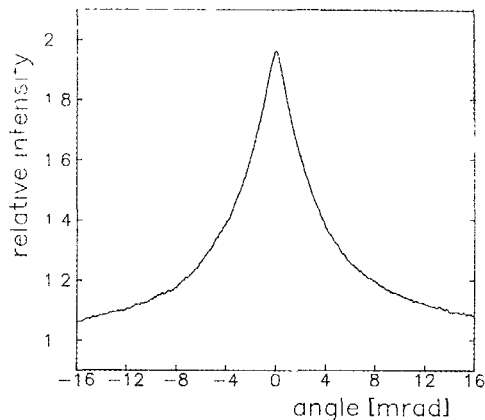


Fig 3  
Gemeten intensiteit van licht verstrooid van een verdunde oplossing van witte verf. In de figuur correspondeert hoek 0 mrad met precies terugverstrooiing. Duidelijk is de toegenomen terugverstrooiing te zien. Let op de kleine schaal van de hoeken!

gere golflengte. Als gevolg hiervan kan men de gemiddelde vrije weglengte niet korter maken dan de golflengte door de golflengte maar groter en groter te maken. Voor elektronen die in de langgolvlige limiet golflengte-onafhankelijke s-golfverstrooiing vertonen kan dat wel b) Bij zeer geconcentreerde suspensies neemt de vrije weglengte niet meer af met een toename in concentratie van de strooicentra omdat èn het licht niet meer verstrooid wordt van *onafhankelijke* verstrooiers ("afhankelijke verstrooiing") èn er sterke dichtheidsrelaties zullen optreden in de verdeling van de strooicentra (wie heeft wel eens gehoord van een volumefractie groter dan 100%?).

Vanuit de theorie ontwikkeld in de vastestoffysica weten we dat de dimensie van het medium van belang is voor lokalisatie. Lokalisatie blijkt makkelijker te bewerkstelligen in een tweedimensionaal dan in een driedimensionaal medium. Martin van der Mark heeft in ons laboratorium een fraai quasi-twee dimensionaal medium gefabriceerd. Een groot aantal zeer dunne glasvezels (ongeveer 1000 x 1000) werden parallel maar willekeurig gestapeld. Van een lichtbundel die loodrecht inkomt op de axiale richting wordt de verstrooiing in de loodrechte richting beschreven met een tweedimensionale golfvergelijking met wanorde. De derde richting is coherent en kan eenvoudig uit de golfvergelijking gefactoriseerd worden.

Een andere suggestie om het optreden van sterke lokalisatie te stimuleren, komt ook uit de theorie van de gecondenseerde materie. Stel dat men een "optisch kristal", dat wil zeggen een diëlektrische structuur met een driedimensionale periodieke variatie van de brekingsindex, kan maken. Het uitrekenen van de elektromagnetische modi van deze "trilholte" is volkomen analoog aan het uitrekenen van quantummechanische golf functies (bandenstructuren) in de vaste stoffen. Deze artificiele structuren hebben op zich een aantal interessant wetenschappelijke aspecten. Maar wat ons

nu interesseert is wat er gebeurt als we in dit driedimensionale rooster wanorde aanbrengen. We verwachten dat het veel makkelijker is om het licht te lokaliseren in deze media omdat in deze structuren alleen al zonder wanorde het licht zich heel moeilijk door het kristal voortplant: het licht moet zich in allerlei "bochten" wringen. Deze interessante suggestie is afkomstig van Sajeew John van Princeton en het wachten is nu op het maken van deze structuren.

Er zijn heel veel ontwikkelingen, maar de echte lokalisatie is nog niet gevonden. Wel hebben zeer recent Drake en Genack (Bellcore en CUNY) met een preparaat gemaakt van anatase bolletjes een extreem lage diffusieconstante voor de propagatie van licht gevonden.<sup>4</sup>

### Spikkels

Lokalisatie van het elektron in de vaste stof blijkt niet het enige effect te zijn waarbij interferentie van veelvuldig verstrooide golven een cruciale rol speelt. Een ander effect, meestal aangeduid als "universele" fluctuaties in de geleidbaarheid van elektronen in vaste stoffen, behoort ook tot deze nieuwe klasse van interferentieverschijnselen. Evenzo in dit geval is er een optisch analogon. Sterker nog, dit optische effect was allang bekend in de optica en de fysici bezig met de universele fluctuaties waren in het begin bezig met het wiel opnieuw uit te vinden.

Laten wij het optische analogon eens wat nader bekijken. Interferentieverschijnselen van licht zijn voor wie daar oog voor heeft alom tegenwoordig. Vaak heeft het optreden van deze fenomenen te maken met de aanwezigheid van een mooie symmetrische structuur. Denk bijv. aan tralies (een groot aantal lijnen keurig parallel) of aan een dunne film (twee grensvlakken keurig parallel). Indien we een coherente lichtbron gebruiken dan blijkt dat ook in materialen met een wanordelijke structuur (vaak hinderlijke) interferentie optreedt. Een wel zeer sprekend voorbeeld is de verstrooiing van laserlicht aan een ruw (stationair) op-

pervlak In zo'n geval ziet men een grillige intensiteitsverdeling over het oppervlak (korrelstructuur). Het effect is zeer duidelijk waar te nemen met bijv. een He-Ne laser en een lens op een niet-gladde muur Dit verschijnsel wordt in het Engels "speckle" genoemd. Spikkel dus. Het flonkeren van sterren is ook verbonden met het optreden van spikkel. In de voortplanting van laserlicht door glasvezels kent men dit (hinderlijke) verschijnsel als "modal noise" Het optreden van spikkel van ruwe oppervlakken is een zeer goed begrepen fenomeen: een eenvoudig wiskundig sommetje leert dat de variatie op het gemiddelde van het kwadraat van de som van een aantal willekeurige *complexe* getallen ongeveer even groot is als het gemiddelde van het kwadraat van de som zelf.<sup>5</sup>

Bij de studie van spikkel in de optica was het tot nu toe gebruikelijk om naar de reflectie te kijken. Vaak bestonden de ruwe oppervlakken die bestudeerd werden uit dunne metaalfilms zodat deze beperking tot de studie van de reflectie eigenlijk vanzelfsprekend was. In de vastestoffysica werden enkele jaren geleden fluctuaties waargenomen in de geleidbaarheid van elektronen. Deze fluctuaties blijken gewoon spikkels te zijn, evenwel niet in reflectie maar in transmissie (geleidbaarheid is verbonden met het aantal elektronen dat d00r de geleider heenkomt). Dat de waarneming van dit effect voor elektronen zolang op zich heeft laten wachten, komt omdat men pas recent monsters zo klein kan maken dat elektronen geen *inelastische* botsing meer maken in het materiaal maar alleen *elastische* botsingen ondergaan. Bij inelastische botsingen treed verlies van fase van de golf functie van het elektron op met als gevolg uitsmering van fluctuaties. In de theorie van de gecondenceerde materie heeft men voorspeld dat als het elektron zich in het preparaat heeft voortgeplant volgens een diffusiewet er correlaties opgebouwd worden door interferentie die zich uiten in een correlatie in intensiteit tussen de verschillende uittreerichtingen Het

zal de lezer hopelijk nu wel duidelijk zijn dat dit ook zou moeten gelden voor licht en in onze groep zijn wij dan ook druk bezig met het opsporen van deze correlaties. Zeer recent heeft Meint van Albada, 00n van deze (twee) nieuwe vormen van correlatie zeer duidelijk aangetoond met optische experimenten. In de vastestoffysica wordt dit gezien als een belangrijke bevestiging van het theoretische model.

## Filosofie

De quantummechanica is een golfmechanica Zolang als er geen sprake is van meerdeeltjes systeem en de statistiek (bosonen en fermionen) geen rol speelt dan is de quantummechanica eigenlijk alleen maar golfmechanica Het probleem van de interpretatie van de golf functie laat ik nu geheel buiten beschouwing Veel fysici krijgen een zeer gedegen opleiding in de quantummechanica. In motiveringen hiervoor wordt gebruik gemaakt van karakterisering en vari0rend van "quantummechanica is zeer fundamenteel" en "quantummechanica is zeer nuttig" tot "quantummechanica is onontbeerlijk voor een goed inzicht in de microscopische fysica" Om dezelfde reden wordt optica veel minder uitgebreid onderwezen in universitaire omgeving ("minder fundamenteel" en "minder belangrijk voor begrip van microscopische fysica"). Het nadeel van deze aanpak is onder andere dat de aldus opgeleide student verwondering over een verschijnsel en het nadien begrijpen van het verschijnsel heel vaak interpreteert als een "essentieel quantum-mechanisch" effect Een aantal van deze verschijnselen komen echter ook voor in de optica en zijn geheel analoog aan hun quantummechanische tegenhangers (afgezien van het interpretatieprobleem van de golf functie natuurlijk) Sterker nog een aantal van deze verschijnselen waren allang ontdekt in de optica en akoestiek voordat de quantummechanica ze herontdekte Deze voorbeelden gaan zeer ver terug. De "Born benadering" van



de quantummechanica heet in de optica gewoon "Raleigh-Gans" verstrooiing

Een aantal fundamentele verschijnselen komen zowel in de optica als in de quantummechanica voor. Hier noem ik tunneling door een barrière met als optisch analoog de transmissie van licht door een dunne, optische dichte, laag met een hoek van inval groter dan de grenshoek. Gebonden toestanden in een potentiaalputje met als optisch equivalent het aantal modes in een trilholte met analoge afhankelijkheden van de dimensie van het medium (zoals de "ééndimensionale" glasvezel). De zeer fraaie experimenten van het transport van elektronen in golfgeleiders ("optica van elektronen") uitgevoerd door medewerkers van het Philips Natuurkundig Laboratorium en de Technische Universiteit Delft<sup>6</sup> zijn ook een illustratie van het optreden van deze analogieën. Zoals in deze beschouwing aangetoond, is ook het transport door sterk verstrooiende media zeer analoog. Verschijnselen zoals zwakke lokalisatie en lokalisatie komen waarschijnlijk voor in elke golfvergelijking. Gedemonstreerd zijn deze effecten in ieder geval voor quantummechanica en optica. Universele fluctuaties in transmissie en reflectie komen in de beide gebieden voor. Ook vanuit wiskundig oogpunt zijn er zeer grote gebieden van overlap. Vaak kan men de Maxwell vergelijking in een bepaalde omstandigheid (zoals de paraxiale benadering) exact afbeelden op de Schrödingervergelijking. Adriaan Tip (AMOLF) heeft zich verdiept in de studie van puntdeeltjes in de Schrödingervergelijking. Zijn uitbreiding van zijn theoretische resultaten naar de Maxwellvergelijking blijkt heel nieuwe gezichtspunten op te leveren.

Er is duidelijk sprake van een zeer fascinerende ontwikkeling. Twee vakgebieden die

elkaar opjagen en tot steeds groter eenheid komen. Mooier kan het toch niet. Een nadeel is wel dat soms echte optische verhandelingen verschijnen in tijdschriften die zich gespecialiseerd hebben in vastestoffysica. Een extra belasting dus voor de hedendaagse fysicus die toch al gebukt gaat onder het gewicht van de hoeveelheid tijdschriften die bijgehouden moeten worden. Willem van Haeringen en Daan Lenstra van de Technische Universiteit Eindhoven hebben op dit gebied belangrijke bijdragen geleverd. Zij hebben nu een boek geredigeerd waarin een overzicht wordt gegeven van een aantal van deze ontwikkelingen. Voor de belangstellende van harte aanbevelen.<sup>6</sup>

#### Literatuurverwijzingen:

1. P.W. Anderson, Phys. Rev. 109 (1958) 1492.
2. M.P. van Albada, M.B. van der Mark en A. Lagendijk, Phys. Rev. Lett. 55, (1985) 2692; zie ook P.E. Wolf en G. Maret, Phys. Rev. Lett. 55, (1985) 2696.
3. M.B. van der Mark, M.P. van Albada en A. Lagendijk, Phys. Rev. B 37 (1988) 3575.
4. *Laser speckle and related phenomena*, onder redactie van J.C. Dainty (Springer, Berlin, 1984).
5. J.M. Drake en A.Z. Genack, Phys. Rev. Lett. 63, (1989) 259.
6. B.J. van Wees, H. van Houten, C.W.J. Beenakker, J.G. Williamson, L.P. Kouwenhoven, D. van der Marel en C.T. Foxon, Phys. Rev. Lett. 60, (1988) 848.
7. *Analogies in optics and micro-electronics*, onder redactie van W. van Haeringen en D. Lenstra (wordt binnenkort gepubliceerd)