

Nederlandse samenvatting

Dit proefschrift behandelt de voortplanting van licht door een wanordelijke structuur. Bij een wanordelijke structuur moet je je een medium voorstellen met willekeurig geplaatste obstakels. Het licht kan niet eindeloos recht door reizen, maar botst op een gegeven moment op een obstakel. De botsing zorgt er voor dat het licht verder reist in een andere richting, het licht wordt verstrooid. Het licht kan natuurlijk ook geabsorbeerd worden bij de botsing, maar in dit proefschrift worden obstakels gebruikt die het licht alleen maar verstrooien. De gemiddelde afstand die het licht reist voordat het botst met een obstakel wordt de vrije weglengte genoemd. Als het licht door een wanordelijke structuur reist dat vele vrije weglengten dik is, zal het vele malen verstrooien voordat het er doorheen gekomen is. De werkelijk afgelegde afstand is veel groter dan de hemelsbrede afstand. De manier waarop het licht zich verspreidt wordt diffusie genoemd. Het is te vergelijken met een dronkemanswandeling. Zwaar beneveld door de alcohol probeert een man een brede straat over te steken. Na elke stap verliest hij zijn evenwicht, staat weer op, en doet een nieuwe stap in een willekeurige richting. Je kan je voorstellen dat het even duurt voordat hij de overkant bereikt heeft. De kans dat hij überhaupt de overkant bereikt bij elke poging de straat over te steken is slechts zijn stapgrootte gedeeld door de breedte van de straat, afgezien van eventueel verkeer (dat hier voor een vrij gruwelijke vorm van absorptie zorgt).

Diffusie van licht is geen exotisch verschijnsel dat alleen onder moeilijke omstandigheden in een laboratorium optreedt. Een mooi voorbeeld uit het dagelijks leven is een glas melk. Kleine vetbolletjes die in de melk drijven verstrooien het licht, het licht propageert diffusief door de melk. Omdat de vloeistof en de vetbolletjes het licht niet absorberen, ziet de melk er wit uit. Andere voorbeelden van een wanordelijke structuur voor licht zijn (dikke) mist en witte muurverf. Hoofdstuk 2 behandelt voornamelijk de diffuse voortplanting van licht door een laagje witte verf.

Bovenstaande beschrijving van licht is gebaseerd op een deeltjesbeeld en wordt wel klassieke diffusie genoemd. Licht is eigenlijk een golf, een electro-magnetische golf, en golven kunnen met elkaar interfereren. Twee golven kunnen elkaar versterken of uitdoven. Voor watergolven kun je dit waarnemen in een (zwem)bad of afwasteiltje. Het golfkarakter van licht en de daarmee samenhangende interferentie zorgt voor een aantal interessante verschijnselen in de voortplanting van licht door een wanordelijke structuur. Licht is niet het enige dat een golfkarakter heeft. Elektronen hebben ook een golfkarakter, net als geluidsgolven. In de quantum mechanica worden zelfs alle deeltjes (interacties) beschreven met golf functies. Het mag duidelijk zijn dat interferentie een zeer veel voorkomend verschijnsel is in de natuurkunde. Meestal wordt het optreden van veelvuldige verstrooiing van golven gezien als de vervuiling van een schoon systeem (in electrontransport worden verstrooiingscentra onzuiverheden genoemd). Wij zijn juist geïnteresseerd in deze “vuile” systemen. Veelvuldige verstrooiing van laserlicht in een laagje witte verf is een ideaal model-systeem om interferentieëffecten in wanordelijke structuren te bestuderen.

In hoofdstuk 3 worden twee interferentieverschijnselen behandeld die wij experimenteel hebben waargenomen. Het eerste verschijnsel beschrijft de interferentie van licht op de detector dat langs verschillende paden door het verfmonster is gereisd. De dronkemanswandeling zorgt er voor dat alle paden door het monster een verschillende lengte hebben. De bijdragen van alle paden kunnen zowel destructief als constructief met elkaar interfereren. De waargenomen intensiteit kan sterk variëren, en hangt af van de realisatie van padlengten. Voor een ingevroren wanorde (de verstrooiers staan op een vaste plaats) is de waargenomen intensiteit constant. Als echter de golflengte van het laserlicht wordt veranderd, verandert ook de waargenomen intensiteit, omdat de fase verandert waarmee de golven, die langs verschillende paden hebben gereisd, aankomen bij de detector. De fase verandert omdat het aantal golflengten dat past in een pad met een bepaalde lengte anders is geworden. Een meting van de fluctuaties in de intensiteit als functie van de verandering van de golflengte van het laserlicht geeft informatie over de padlengtedistributie in het monster. Een belangrijke fysische parameter, de diffusieconstante van het licht, kan hiermee bepaald worden. Omdat de gemeten intensiteit snel verandert met de verandering van de golflengte, wordt de gemeten correlatiefunctie de korte-dracht correlatiefunctie genoemd.

Het tweede verschijnsel beschrijft de interferentie van het licht *in* het verfmonster. Ook in het verfmonster komen golven die langs verschillende paden hebben gereisd elkaar tegen en interfereren met elkaar. Veronderstel dat de golven constructief interfereren. Lokaal is de intensiteit dan hoger dan gemiddeld. Deze lokaal hogere intensiteit reist langs verschillende paden verder door het verfmonster (verspreidt zich door het monster). Het bijzondere is dat er nu samenhang (correlatie) is ontstaan in de intensiteit in het verfmonster. De invloed van dit interferentieëffect is meetbaar op de totale hoeveelheid licht die door een laagje witte verf heen komt. Deze totale transmissie fluctueert veel langzamer met het veranderen van de golflengte van het licht, en daarom wordt de correlatie op de totale transmissie de lange-dracht correlatiefunctie genoemd. In hoofdstuk 3 wordt uitgerekend hoe groot beide effecten zijn en hoe snel de gemeten intensiteit verandert met het veranderen van de golflengte van het inkomende licht. Vooral het laatste effect vereist enig rekenwerk omdat de precieze omstandigheden waaronder het experiment werd uitgevoerd meegenomen moesten worden.

Een effect dat niet beschreven wordt in dit proefschrift is de interferentie tussen twee golven in het monster die even verder weer met elkaar interfereren. Dit effect is waargenomen voor elektronen in 1984, en wordt de universele geleidingsfluctuatie genoemd. De analogie tussen elektronen en licht (hun golfkarakter) was een belangrijke aanleiding voor de experimenten met licht.

In hoofdstuk 4 wordt de experimentele opstelling beschreven om de fluctuaties in de intensiteit als functie van de golflengte te meten. Vooral het meten van de lange-dracht correlatie vereiste zorgvuldigheid, omdat de fluctuaties niet groot zijn. De resultaten van de metingen worden uitstekend beschreven door de berekeningen in het vorige hoofdstuk. De meting van fluctuaties op de totale transmissie was de

eerste experimentele bevestiging van de volledige lange-dracht correlatiefunctie.

Voor hoofdstuk 5 is opnieuw inspiratie geput uit de analogie tussen elektronen en licht. Behalve naar de correlatie in de fluctuaties van de intensiteit kan je ook kijken naar de distributie van de fluctuaties. De distributie van de fluctuaties beschrijft hoe groot de kans is dat je een bepaalde waarde voor de intensiteit meet. De interferentieprocessen die leiden tot de lange-dracht correlatie geven een Gaussische distributie van de fluctuaties. De theorie voor de universele geleidingsfluctuaties voor elektronen voorspelt in de simpelste benadering ook een Gaussische distributie van de geleidingsfluctuaties, die verandert in een log-normale distributie als ingewikkeldere interferentieprocessen worden meegenomen. De distributie van de universele geleidingsfluctuaties voor elektronen is echter tot op heden niet experimenteel gemeten. De vraag was of in onze metingen van de fluctuaties op de totale transmissie voor licht misschien een afwijking van de Gaussische distributie aangetoond kon worden. Dat zou betekenen dat nieuwe interferentieprocessen een rol spelen die anders zijn dan diegene die leiden tot de lange-dracht correlatie. Een zorgvuldige analyse van de metingen toont inderdaad een afwijking aan van de Gaussische distributie. Niet alleen kwalitatieve, maar zelfs kwantitatieve overeenstemming wordt aangetoond tussen de metingen en berekeningen van de nieuwe interferentieprocessen. Dat deze nieuwe interferentieprocessen voor het eerst experimenteel aangetoond konden worden geeft aan dat de metingen in hoofdstuk 4 van zeer hoge kwaliteit waren.

In de appendices worden diagrammatische berekeningen uitgevoerd van de interferentieprocessen die eerder op een andere manier (in de Langevin aanpak of op een heuristische wijze) zijn berekend in hoofdstuk 3 en hoofdstuk 5.

In hoofdstuk 6 wordt naar de interferentie gekeken van frequentie verdubbeld licht in een wanordelijke structuur. De interferentie van frequentie verdubbeld licht wordt vergeleken met interferentie in het fundamentele licht in een wanordelijke structuur. Frequentie verdubbeling van licht is het proces waarbij een (klein) gedeelte van het inkomende licht wordt omgezet in licht met een verdubbelde frequentie (de kleur van het licht wordt omgezet van infrarood naar groen). De omzetting van infrarood naar groen licht is geen lineair proces, de hoeveelheid gegenereerd groen licht is evenredig met het kwadraat van de hoeveelheid infrarood licht. De efficiëntie van dit proces wordt bepaald door de niet-lineaire susceptibiliteit. Een monster werd gemaakt van witte verfdeeltjes met een grote niet lineaire susceptibiliteit. Als dit monster wordt beschoten met zeer intense infrarode laserpulsen, wordt een klein beetje groen licht gegenereerd. Zowel in reflectie als in transmissie is de korte-dracht correlatiefunctie gemeten in zowel het infrarode als het groene laserlicht. Het belangrijkste resultaat is een totaal verschillend gedrag van de korte-dracht correlatiefunctie voor het infrarode en het groene licht in reflectie.