

Samenvatting

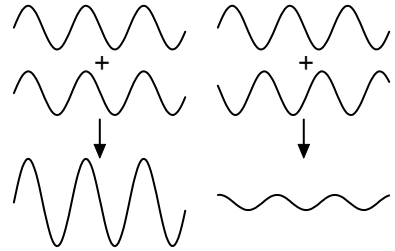
Dit proefschrift gaat over licht in zogeheten fotonische kristallen, materialen die de voortplanting van licht beïnvloeden door hun structuur. Het doel van fotonische kristallen is om als het ware een kooi voor licht te verwezenlijken. Zo'n ingrijpende verandering van de voortplanting van licht is niet alleen vanuit een wetenschappelijk standpunt interessant, maar ook van belang voor bijvoorbeeld de telecommunicatie. In de moderne telecommunicatie wordt veel gebruik gemaakt van licht, om snel grote hoeveelheden gegevens te transporteren via glasvezels. In de toekomst zal het belang van licht voor de informatievoorziening waarschijnlijk nog toenemen. Er is voorspeld dat de veranderde voortplanting van licht in fotonische kristallen aanleiding zal geven tot vele nieuwe natuurkundige verschijnselen. Controle over de voortplanting van licht biedt bijvoorbeeld de mogelijkheid om het uitzenden van licht te beïnvloeden en zo de efficiency van lasers te verbeteren, of ruis te verminderen onder de grens van het normaal mogelijke.

De voortplanting van licht kan worden beïnvloed door doorzichtige materialen samen te voegen tot een geschikte structuur, en gebruik te maken van interferentie. Fotonische materialen kunnen bijvoorbeeld als spiegel gaan werken. Een belangrijk verschil met gewone spiegels is dat fotonische kristallen ook *binnenin* weer spiegelen: ze weerkaatsen niet alleen het licht dat er van buitenaf op valt, maar ook licht dat van binnen komt. Deze inwenige weerspiegeling kan belangrijke gevolgen hebben voor lichtbronnen binnen fotonische kristallen. Zulke lichtbronnen krijgen hun licht dan meteen teruggespiegeld, waardoor zij nooit licht kunnen uitzenden. Als een bepaalde kleur licht in alle richtingen goed weerspiegeld wordt, dan is die kleur licht opgesloten. Om te begrijpen hoe doorzichtige materialen als spiegel kunnen werken, is het van belang om je te realiseren dat doorzichtige voorwerpen eigenlijk zelden onzichtbaar zijn. Dit komt doordat ze ook licht weerkaatsen. Meestal weerkaatst maar een klein gedeelte van het licht: een etalageruit bijvoorbeeld is op de eerste plaats doorzichtig, al kun je er jezelf ook in weerspiegeld zien. De weerspiegeling is genoeg om de ruit op te merken, maar er weerkaatst veel minder licht dan van een echte spiegel. Om een goede spiegel te maken is véél weerkaatsing nodig.

Om een sterkere reflectie te krijgen, maken we gebruik van het feit dat licht zich gedraagt als golf. Golven kunnen elkaar versterken, als de toppen van de ene golf samenvallen met de toppen van de andere golf, of juist uitdoven, als de toppen van de ene golf samenvallen met de dalen van de andere, zie de figuur. Het verschijnsel

wordt ‘interferentie’ genoemd; het doet zich ook bij licht voor. De afstand tussen opeenvolgende golfdalen van lichtgolven – de golflengte – nemen wij waar als de kleur van het licht. Zichtbaar licht heeft een golflengte van ongeveer 0.0005 mm.

Als licht weerspiegelt aan een dun laagje doorzichtig materiaal, ontstaan heldere kleuren als gevolg van interferentie. Een alledaags voorbeeld hiervan zijn de regenboogkleuren die je ziet als er een druppel olie in een plas water terecht is gekomen. De olie spreidt zich uit tot een dunne laag op het water. De lichtgolven die terugkaatsen van het spiegellende wateroppervlak interfereren met lichtgolven die terugkaatsen van het spiegellende olieoppervlak. Ze versterken elkaar of doven elkaar uit, afhankelijk van de dikte van het olielaagje en de golflengte (kleur) van het licht. Wit licht wordt op die manier door de oliefilm opgesplitst in de samenstellende kleuren. De kleuren van parelmoer en de heldere kleuren op de vleugels van vlinders ontstaan op een vergelijkbare manier. In deze gevallen zijn er meer laagjes bij de interferentie betrokken, daarom reflecteert er meer licht en zijn de kleuren feller.



Interferentie: golven die elkaar versterken of uitdoven

De kleuren van een oliefilm veranderen als je er onder een andere hoek naar kijkt. Zulke veranderende kleuren zijn natuurlijk mooi om te zien, maar onwenselijk als je een bepaalde kleur licht op wilt sluiten. In een fotonisch kristal moet deze kleur licht worden weerkaatst, ongeacht de richting waarin het licht gaat. Dit kan bereikt worden door een ruimtelijke structuur te gebruiken in plaats van dunne laagjes. Omdat het materiaal er dan vanuit verscheidene gezichtspunten vergelijkbaar uitziet, reflecteert het steeds dezelfde kleur.

Om optimaal gebruik te maken van interferentie om de weerkaatsing van een bepaalde kleur te versterken, is het van belang dat de ruimtelijke structuur van fotonische materialen regelmatig is. Onregelmatig opgebouwde structuren zijn gewoonlijk ondoorzichtig wit, zoals matglas of poedersuiker. Door natuurkundigen wordt een regelmatige ruimtelijke structuur gewoonlijk een ‘kristal’ genoemd, naar analogie met de regelmatige rangschikking van atomen in gewone kristallen. De gelijkenis gaat nog verder: vele eigenschappen van gewone kristallen, zoals stroom- en warmtegeleiding, houden verband met hun regelmatige structuur, net als de gewijzigde voortplanting van licht in fotonische kristallen. Deze gelijkenis verklaart de benaming ‘fotonische kristallen’. Materialen met een regelmatige bouw worden niet alleen kunstmatig gemaakt, er zijn ook fotonische kristallen van natuurlijke oorsprong; een voorbeeld is de edelsteen opaal, een opeenstapeling van kleine glazen bolletjes, die zijn glimmende kleuren ontleent aan interferentie.

Wij hebben fotonische kristallen gemaakt van kleine bolletjes in water en daarin de voortplanting van licht onderzocht. We hebben gemeten welke kleuren licht er doorheen gaan en welke weerkaatst worden. De golflengtes van het tegengehouden licht stemmen goed overeen met de afstanden tussen de lagen bolletjes, die bekend zijn uit onze metingen met behulp van Röntgenstraling. Het kleuren-bereik van de spiegeling klopt met onze berekeningen. Het blijkt dat er een optimale volumeverhouding bollen:water is waarbij de kristallen zo veel mogelijk kleuren tegelijk weerspiegelen. Als het volume-aandeel water veel groter is dan het volume-aandeel bolletjes of vice versa, dan worden er minder kleuren weer-spiegeld. Dit zou men ook verwachten, immers het water en het materiaal van de bolletjes zijn ieder apart gewoon doorzichtig.

Om te zien of fotonische kristallen nu inderdaad invloed hebben op het uitzenden van licht, is het noodzakelijk om lichtbronnen binnenin de kristallen te maken. Hiervoor hebben we bolletjes gemaakt met een fluorescerende kleurstof erin. Zulke kleurstoffen kunnen licht opnemen, en zenden dan specifieke kleuren licht uit. Fluorescerende kleurstoffen zijn echter niet alleen gevoelig voor de weerspiegeling van fotonische kristallen maar ook voor de scheikundige samenstelling van hun omgeving, en de kleurstofmoleculen beïnvloeden elkaar als ze dicht bij elkaar zitten. Daarom hebben we eerst gekleurde bolletjes apart bestudeerd, zonder weerspiegelingseffecten. We hebben gemeten welke kleuren licht de kleurstof uitzond en hoe lang het licht opgeslagen bleef in de kleurstof, voor verschillende hoeveelheden kleurstof in de bolletjes. Het bleek dat een grote hoeveelheid kleurstof een kortere opslagtijd van het licht tot gevolg heeft. De waargenomen variatie in opslagtijden suggereert dat de kleurstof niet gelijkmatig verdeeld is, maar samenklontert binnenin de bolletjes. Deze ongewenste invloeden kunnen vermeden worden door maar een heel klein beetje kleurstof in de bolletjes in te bouwen.

We hebben kristallen met inwendige lichtbronnen gemaakt van glazen bolletjes met een heel klein beetje fluorescente kleurstof erin. De glazen bolletjes zijn allemaal even groot, en zweven rond in een glazen buisje gevuld met water. Onder invloed van de zwaartekracht zakken de bolletjes langzaam naar de bodem van het buisje. Door het uitzakken neemt de dichtheid van bolletjes toe en ontstaan er vanzelf kristallen. De bolletjes stoten elkaar enigszins af doordat ze geladen zijn. Deze afstoting kan verminderd worden door zout aan het water toe te voegen. Extra zout vergroot zowel de snelheid van het naar beneden zakken van de bolletjes als de dichtheid van de uiteindelijke kristallen. Door hier gebruik van te maken hebben we kristallen verkregen met de optimale bolletjes/water-verhouding. De kristallen zijn opzettelijk zo gemaakt dat de kleur van de weerspiegeling overeenkomt met de kleur van de kleurstof.

De invloed van de weerkaatsing binnenin de kristallen op de kleurstof is heel duidelijk merkbaar in de uitgezonden kleuren licht die je buiten het kristal ziet: de

kleur licht die binnenin weerkaatst wordt is een stuk zwakker. De verzwakking blijkt echter minder dan de verzwakking van licht dat van buitenaf komt. uit onze experimenten blijkt dat de verminderde verzwakking niet afhangt van de plaats van de lichtbron in het kristal. Er is meer aan de hand dan alleen maar weerspiegeling van regelmatige lagen bollen: de weerkaatsing aan onregelmatigheden in de kristallen speelt ook een belangrijke rol. Deze onregelmatigheden weerkaatsen licht in willekeurige richtingen. Als gevolg hiervan komt er van alle kleuren licht wel een gedeelte naar buiten, ook van kleuren licht die binnenin weerkaatst worden.

De tijd die het licht in de kleurstof opgeslagen blijft, hebben we ook gemeten. In tegenstelling tot de schakering van uitgezonden kleuren, blijkt de gemeten tijd niet af te hangen van de wisselwerking tussen licht en de fotonische kristallen. Dit is een gevolg van de richtings- en kleurafhankelijkheid van de weerspiegeling van de kristallen. De tijd die verstrijkt tussen het opnemen en uitzenden van licht, de spontane-emissietijd, is een maat voor de mogelijkheden die de kleurstof heeft om licht af te geven. De kleurstof kan in allerlei richtingen en kleuren uitzenden, ook richtingen waarvoor geen weerkaatsing optreedt. Hierdoor blijven er nog genoeg mogelijkheden over om het licht kwijt te raken, en de spontane-emissietijd verandert niet merkbaar.

De kleine glazen bolletjes in water waar we de kristallen van gemaakt hebben, zijn een voorbeeld van een colloïd, een materiaal dat bestaat uit een fijn verdeeld mengsel van twee fasen. Colloïden zijn alom tegenwoordig in het dagelijks leven; slasaus (druppeltjes olie in azijn), gel, inkt (vast stoffen in vloeistoffen), en scheerschuim (gas in vloeistof) zijn er voorbeelden van. Ook het menselijk lichaam bestaat uit colloïden. Colloïden zijn bijzonder geschikt om fotonische kristallen van te maken, aangezien ze van nature ongeveer de juiste grootte hebben en vanzelf kristallen kunnen vormen. Het is echter ingewikkeld om de opbouw van zulke kristallen te achterhalen met behulp van licht, immers de fotonische kristallen zijn bedoeld om de voortplanting van licht te veranderen! Met behulp van Röntgenstraling zijn we er toch in geslaagd om informatie te verkrijgen over de opbouw van colloïdale fotonische kristallen. Hiervoor hebben we experimenten gedaan in Grenoble in Frankrijk, waar een zeer felle Röntgenbron beschikbaar is. Het blijkt dat de kristallen bijzonder goed geordend zijn, honderden bolletjes liggen keurig op rijtjes, zowel in de breedte en hoogte als in de diepte. De experimenten tonen aan dat kleine-hoek Röntgenverstrooiing met een synchrotronbron en twee-dimensionale detectie bijzonder geschikt is voor het bestuderen van colloïdale systemen.

Als voortvloeijsel van deze zeer nauwkeurige metingen hebben we de groottes, groottevariaties, scherpte van het oppervlak en de dichtheid kunnen bepalen van verschillende soorten colloïdale bolletjes, in hun natuurlijke omgeving. Het blijkt dat de meeste colloïden beantwoorden aan het beeld van homogene, eenvormige

bolletjes met een scherpe rand. De gemeten groottes en groottevariaties komen goed overeen met resultaten van andere technieken, maar zijn nauwkeuriger en volgen uit één enkele meting aan de bolletjes in hun natuurlijke omgeving. Bovendien hebben we een handige nieuwe methode gevonden om zelfs zeer kleine variaties in bolletjesgrootte te kunnen bepalen.

Samenvoeging van bovenstaande Röntgenwaarnemingen levert interessante informatie op over de nauwkeurigheid waarmee de bolletjes op hun plaats zitten in de colloïdkristallen. Vanwege de warmtebeweging maken de bolletjes voortdurend kleine uitstapjes rond hun plaats in het kristal. We hebben systematisch de grootte van deze uitwijkingen in kaart gebracht in kristallen waarin de bolletjes dicht op of juist verder van elkaar af zitten. Opmerkelijk genoeg blijkt dat de uitgestrektheid van de warmtebeweging in allerlei verschillende colloïden voornamelijk bepaald wordt door het verschil tussen de dichtheid van de bolletjes en de dichtheid waarbij de bolletjes geen kristal meer vormen maar wanordelijk door elkaar gaan zitten. Het soort wisselwerking tussen de bolletjes blijkt alleen van belang voor zover het de dichtheid bij de smeltovergang beïnvloedt. Verrassend is ook dat de warmtebeweging minder is dan op grond van berekeningen was verwacht. Wellicht spelen wisselwerkingen tussen meer bolletjes tegelijkertijd een rol, of beïnvloedt de aanwezigheid van een vloeistof de beweging.

Een belangrijk doel van het onderzoek aan fotonische materialen is om een kristal te maken dat ten minste één kleur licht goed tegenhoudt, ongeacht de richting waarin het licht gaat. Dit onderzoek laat zien dat colloïden bijzonder geschikt zijn om fotonische kristallen te maken. Kort geleden zijn er nieuwe fotonische kristallen ontwikkeld die veel meer kleuren weerspiegelen, en in veel meer richtingen tegelijk. Deze kristallen zijn opgebouwd uit van nature al beter weerkaatsende doorzichtige materialen, zoals titaandioxide, dat om deze reden ook gebruikt wordt in de betere kwaliteiten witte verf ("titaanwit"). De kristallen worden gevormd met behulp van een soort mal die bestaat uit een colloïdkristal. Het lijkt aannemelijk dat verdere ontwikkelingen binnen afzienbare tijd zullen leiden tot kristallen met de gewenste volkomen weerspiegeling van tenminste één kleur. Zulke kristallen werken dan als kooi voor die kleur licht.

