

Gemanipuleerd licht schijnt dwars door ondoorzichtige materialen

Wat gebeurt er als we met een zaklamp op een velletje papier schijnen? Het papier houdt het meeste licht tegen en het licht dat nog doorgelaten wordt is diffuus: het straalt gelijkmatig uit in alle richtingen. Maar kunnen we ook zorgen dat het licht als een bundel door het papier heen komt? Lang werd gedacht van niet: op zijn weg door het papier komt het licht namelijk een doolhof van honderden deeltjes tegen die het licht willekeurig verstrooien. Ons experiment laat echter zien dat dit wél mogelijk is. Met behulp van interferentie schijnen we licht dwars door het papier heen. Ivo Vellekoop

72

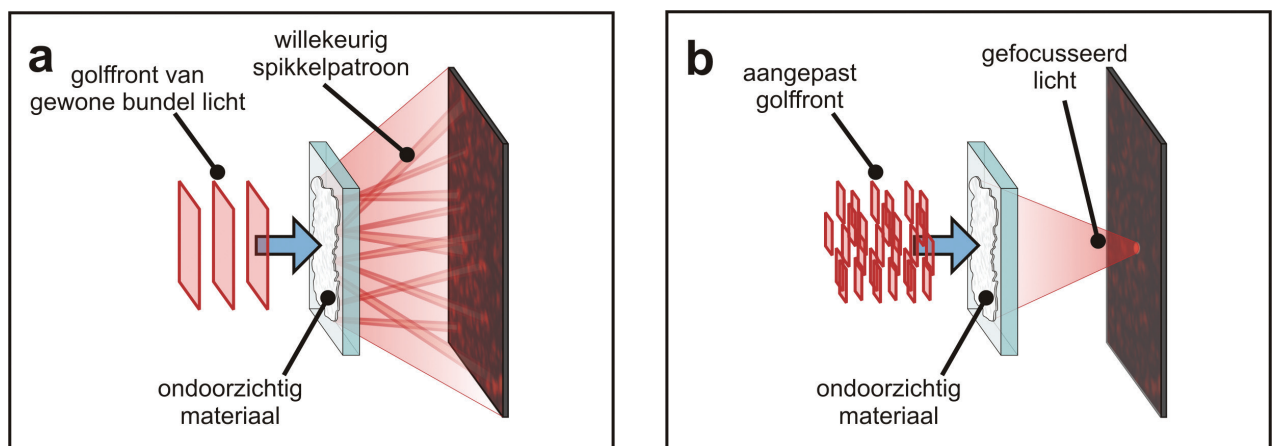
Een flipperkast voor licht

Witte materialen, zoals melk, bot of een velletje papier bevatten kleine, wanordelijk gerangschikte deeltjes. Als een lichtbundel zo'n deeltje raakt, verstrooit een deel van het licht. Dit licht botst vervolgens op andere deeltjes, die het licht verder verstrooien, enzovoort. Deze materialen zijn daar-

mee een soort flipperkast voor licht. Al na een paar keer botsen is het niet meer te zeggen waar het licht oorspronkelijk vandaan kwam. Zulke materialen zijn dan ook volledig ondoorzichtig.

Als we licht van één enkele golflengte gebruiken, zien we dat het verstrooide licht een kenmerkend wanordelijk in-

terferentiepatroon vormt. Dit patroon staat bekend als laserspikkel [1] (zie figuur 1a). Het spikkelpatroon hangt af van de (onbekende) positie van alle deeltjes in het materiaal. Als de deeltjes niet bewegen zal een bepaalde bundel steeds op dezelfde manier verstrooid worden. We kunnen het spikkelpatroon echter wel veranderen



Figuur 1 Principe van het experiment. a) Als een bundel laserlicht op wit materiaal valt, strooit het licht alle kanten op. Doordat het verstrooide licht interfereert, ontstaat er een willekeurig interferentiepatroon. b) We gebruiken een fasemodulator die de golf vorm geeft. Als de vorm van het golffront precies aansluit op het sample zal er dwars door het ondoorzichtige materiaal heen een focus ontstaan.

door de vorm van het binnenkomende golffront aan te passen. Als we bijvoorbeeld van een deel van de golf de fase veranderen krijgen we een ander interferentiepatroon in het doorgelaten licht. Dit idee hebben we nog een stap verder doorgevoerd. We delen de binnenkomende bundel op in een paar duizend segmenten en stellen de fase van elk segment afzonderlijk in. Het doel is om zo het licht door het laagje materiaal heen te focussen (zie figuur 1b).

Een speld in een hooiberg

Voor één specifieke configuratie van de fases zal de intensiteit in het gewenste focus maximaal zijn. Maar hoe vinden we die configuratie? Zelfs als we de fase in grove stappen van $\pi/2$ variëren geeft ons dat met 3000 segmenten nog steeds 4^{3000} mogelijke combinaties. Gewoon maar proberen is dus duidelijk geen optie!

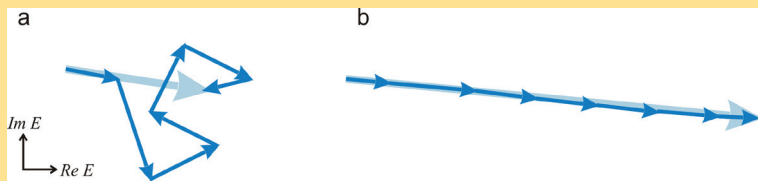
De oplossing voor dit probleem bleek verbazend eenvoudig. We konden namelijk gebruik maken van het feit dat de verstrooiing van elektromagnetische velden lineair is: elk segment van de invallende bundel draagt volledig onafhankelijk van de andere segmenten bij aan het doorgelaten veld. We kunnen daarom voor elk segment afzonderlijk de optimale fase vinden. De hoogst mogelijke intensiteit in het focus wordt bereikt als de bijdragen van alle segmenten in fase zijn (zie ook kader).

De opstelling waarmee we de bundel vormgegeven hebben is te zien in figuur 3. We gebruiken een klein reflecterend displaytje waarvan we de faseverschuiving van elk van de pixels afzonderlijk kunnen instellen. Onze experimentele procedure is als volgt: we veranderen de fase van één enkel segment en houden de fase van de rest van de bundel constant. Een camera meet de intensiteit op het punt waar we willen dat het licht naartoe gaat. Het veld op dat punt bestaat uit twee componenten: de bijdrage van het segment waarvan we de fase veranderen en de ‘achtergrond’ van alle andere segmenten bij elkaar. Als deze twee componenten precies in fase zijn, is de gemeten intensiteit maximaal. Door deze intensiteitsmeting als feedback te gebruiken, kunnen we zo één voor één alle segmenten op dezelfde fase uitlijnen. Na slechts één enkele iteratie zijn alle segmenten

Alle neuzen dezelfde kant op

Hoe zorgen we dat er meer licht op een bepaald punt terecht komt? En hoeveel licht kunnen we daar maximaal krijgen? Als het sample wordt belicht met een niet-gevormde golf draagt elk segment met een willekeurige amplitude en fase bij aan het veld in het gewenste focus [1] (figuur 2a). In de figuur is te zien dat de pijlen een soort dronkenmanswandeling uitvoeren in het complexe vlak. Voor zo’n wandeling is de totaal afgelegde afstand evenredig met \sqrt{N} , waarbij N het aantal stappen is.

Als we nu de fase van elk van de segmenten aanpassen zodat elk segment constructief bijdraagt aan het focus (zie figuur 2b), zien we dat het totale veld maximaal is. De veldsterkte is nu evenredig met N . Dit betekent een toename van \sqrt{N} in de veldsterkte, en daarmee een toename van een factor N in de intensiteit. We verwachten dus een lineair verband tussen de intensiteit in het focus en het aantal onafhankelijke segmenten waar we de bundel in opdelen.



Figuur 2 Opbouw van het veld op een bepaald punt achter het sample. De bijdrage van de afzonderlijke segmenten zijn weergegeven als donkerblauwe pijlen in het complexe vlak. Het totale veld is weergegeven met een lichtblauwe pijl: a) bij een niet-gevormd golffront, b) na het aanpassen van de fase van elk afzonderlijk segment.

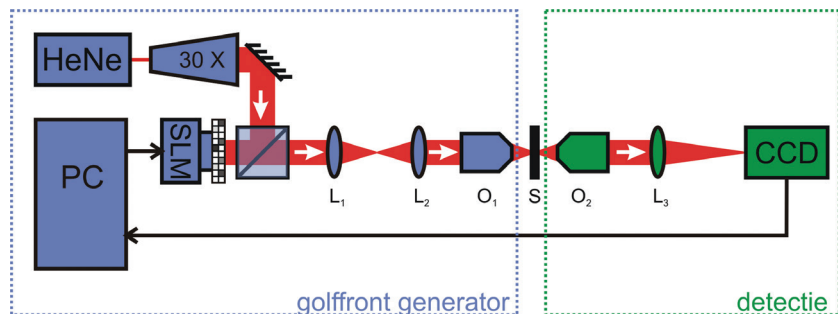
optimaal uitgelijnd en interfereert het licht constructief op het uitgekozen punt [2].

Witte verf focuseert licht

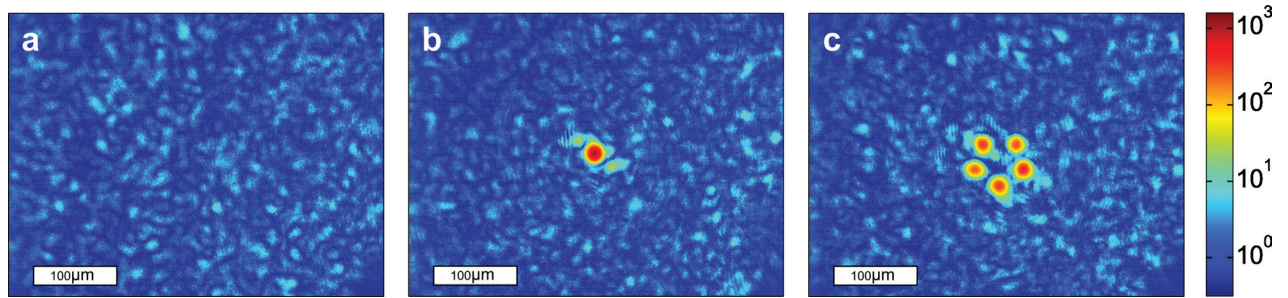
De resultaten van ons experiment zijn te zien in figuur 4. Als we het sample belichten met een niet-gevormd golffront krijgen we het spikkelpatroon in figuur 4a. Maar na het vormgeven van de binnenkomende golf zien we dat het licht door het materiaal heen een scherp focus vormt (figuur 4b). Het

focus is wel 1000 keer zo intens als het oorspronkelijke spikkelpatroon (figuur 4a).

Deze resultaten laten zien dat het mogelijk is om licht door een ondoorzichtig laagje (in dit geval een 10 μm dik laagje titaniumwit pigment) heen te focussen. We hebben het experiment succesvol herhaald met verschillende materialen, waaronder levende bloemblaadjes, eierschalen en een melktand. Het blijkt zelfs mogelijk om verschillende focussen tegelijkertijd



Figuur 3 Schema van de opstelling. De opstelling bestaat uit een deel dat de golffronten genereert en een deel dat het doorgelaten licht detecteert. De kern van de golffrontgenerator wordt gevormd door een lichtmodulator (SLM) die belicht wordt met een helium-neonlaser. Het gevormde golffront wordt via een lenzenstelsel (L_1 , L_2) en een microscoopobjectief (O_1) afgebeeld op het sample (S). Achter het sample bevindt zich een camera (CCD) waarop het doorgelaten licht wordt afgebeeld. De camera levert feedback voor de computer die de lichtmodulator aanstuurt.



Figuur 4 Gemeten transmissie door een ondoorzichtig laagje witte verf: a) belicht met een niet-gevormde golf, b) belicht met een gevormd golffront. De intensiteit in het focus is duizend maal hoger dan voorheen (let op de logaritmische schaal). c) Hetzelfde sample belicht met een ander golffront.

tijd te maken (figuur 4c) als we de intensiteit op verschillende punten als feedback gebruiken.

Eén van de dingen die we verder hebben onderzocht is de rol van het aantal controlesegmenten. We hebben het contrast (de verhouding tussen de intensiteit in het focus en de gemiddelde beginintensiteit) gemeten als functie van het aantal segmenten waarin we de bundel opdelen. De beperkende factor voor het aantal segmenten was hierbij de tijdschaal waarop het verstrooiingsgedrag van het sample verandert (ongeveer een uur). De resultaten van dit experiment zijn te zien in figuur 5. Het blijkt dat hoe preciezer we het golffront controleren, hoe meer licht we in het focus krijgen. Tot een contrast van ongeveer 500 vinden we een lineaire toename van het contrast, precies zoals onze theorie voorspelt (zie kader).

Het onderste uit de kan

Hoe ver kunnen we gaan? De optimale transmissie wordt bereikt als we alle vrijheidsgraden van het binnenkomende veld onder controle hebben. In een tweede experiment hebben we de opstelling aangepast om deze situatie zoveel mogelijk te benaderen: we gebruikten afzonderlijke displays voor beide polarisaties van het binnenkomende licht en een objectief met een hoog numeriek apertuur om het licht optimaal te kunnen sturen. Ook focuseerden we het licht beter zodat het aantal relevante vrijheidsgraden zo laag mogelijk bleef [2].

Het verrassende resultaat van dit experiment is te zien in figuur 6. Deze figuur toont de intensiteitsverdeling op het achtervlak van het sample, gemiddeld over 77 experimenten. Het blijkt dat de intensiteit niet alleen toeneemt op het punt waar we de in-

tensiteit maximaliseren, maar ook daaromheen! Door te optimaliseren op één punt verhogen we dus de totale transmissie door het hele sample, ten koste van de hoeveelheid gereflecteerd licht.

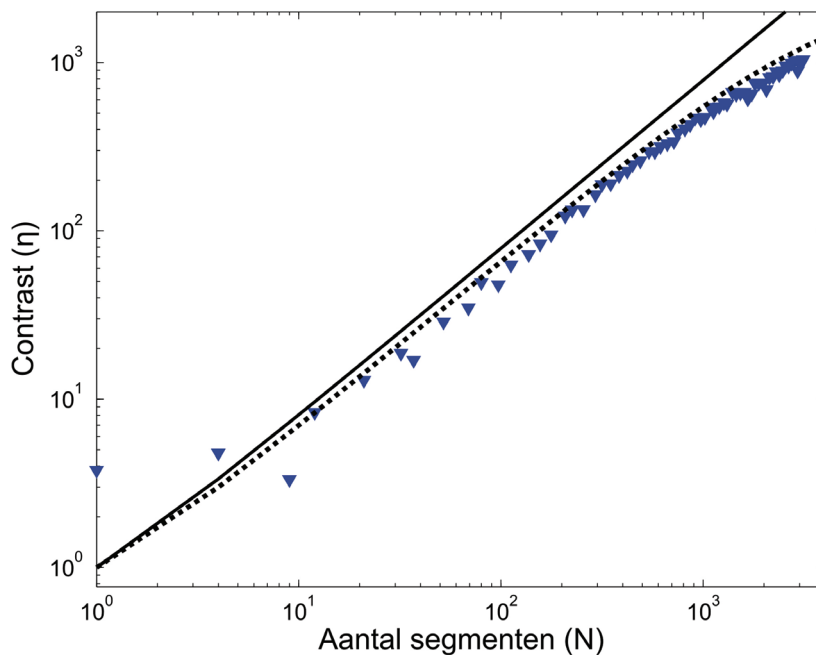
Om dit resultaat te begrijpen gebruiken we een theorie die oorspronkelijk is ontwikkeld voor het verstrooien van elektronen [3], maar ook geldt voor lichtverstrooiing [4]. Volgens deze theorie koppelt een binnenkomende golf zich aan de transportkanalen (een soort eigenmodi) van het sample. Het verrassende is dat de transportkanalen in twee groepen uiteen vallen: de 'open' kanalen hebben een transmissie van bijna 100% en de 'gesloten' kanalen reflecteren bijna al het licht.

Door de intensiteit in het focus te maximaliseren zorgen we impliciet dat het licht beter koppelt aan open transportkanalen. Omdat deze kanalen een zeer hoge (diffuse) transmissie hebben, neemt de totale transmissie toe, ook buiten het focus. Op deze manier geven onze resultaten een direct experimenteel bewijs voor het bestaan van open kanalen [5, 6].

Tot slot

Het is gelukt om licht door een sterk verstrooiend, ondoorzichtig materiaal te sturen en te laten focuseren waar we maar willen. Hiermee hebben we aangetoond dat verstrooiing geen fundamentele belemmering vormt voor het sturen en focuseren van licht. Verder hebben we laten zien dat onze methode ingezet kan worden om fundamentele ideeën over elektronen-transport te toetsen. Omdat we met licht de binnenkomende golf exact kunnen vormen, zijn experimenten mogelijk die voor elektronen momenteel ondenkbaar zijn.

Mogelijke toepassingen zijn verder te vinden in de microscopie of de medische wetenschap. Zo zou het met



Figuur 5 Contrast van het focus als een functie van het aantal controlesegmenten. Driehoekjes: experiment. Doorgetrokken lijn: theoretisch lineair verband. Gestippelde lijn: theorie aangepast voor experimentele parameters zoals de tijdschaal waarop het spikkelpatroon verandert.

Ivo Vellekoop (1977) studeerde aan de Universiteit Twente met lof af op elektrotechniek. Binnen het MESA+ instituut van deze universiteit deed hij daarna voor de stichting FOM onderzoek naar lichtverstrooiing. In 2008 promoveerde hij bij Allard Mosk en Ad Lagendijk op dit onderzoek. Nu werkt hij aan de Universiteit Zürich aan een multidisciplinair onderzoek naar de ontwikkeling van fruitvliegjes.

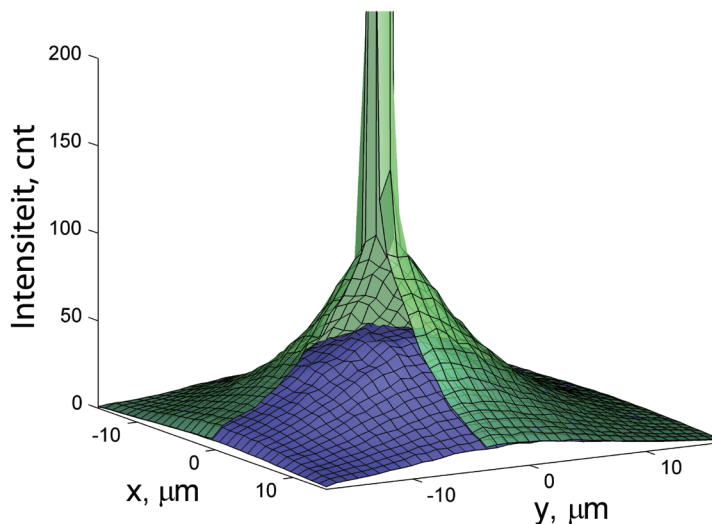


i.m.vellekoop@alumnus.utwente.nl

onze methode ooit mogelijk kunnen worden om cellen door de huid heen afzonderlijk te belichten. Een eerste stap in deze richting hebben we al gezet door licht binnenin verstrooiende materialen te laten samenkomen [7]. En wie weet, misschien kijken we straks wel dwars door dat velletje papier heen.

Referenties

- 1 J. W. Goodman, *Statistical optics* (2000).
- 2 I. M. Vellekoop, PhD thesis 'Controlling the propagation of light in disordered media',



Figuur 6 Transmissie door een $11,3 \mu\text{m}$ dik laagje zinkoxide pigment. Blauw, ongevormd golffront. Groen, gevormd golffront. De intensiteit neemt niet alleen toe in het gevormde focus, maar ook overal daaromheen.

Universiteit Twente (2008). Zie <http://cops.tnw.utwente.nl/>.

- 3 O. N. Dorokhov, *Coexistence of localized and extended electronic states in the metallic phase*, *Sol. St. Commun.* **51**, 381 (1984).
- 4 C. W. J. Beenakker, *Random-matrix theory of quantum transport*, *Rev. Mod. Phys.* **69**, 731 (1997).
- 5 I. M. Vellekoop en A. P. Mosk, *Universal optimal transmission of light through disordered materials*, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 120601 (2008).
- 6 J. B. Pendry, *Light finds a way through the maze*, *Physics* **1**, 20 (2008).
- 7 I. M. Vellekoop, E. G. van Putten, A. Lagendijk en A. P. Mosk, *Demixing light paths inside disordered metamaterials*, *Opt. Expr.* **16**, 67 (2008).

NTvN-Prijsvraag – Uitslag

In 2008 hebben de NNV en het NTvN voor de 15^e keer de NTvN-prijsvraag uitgeschreven. In het verleden was de belangstelling onder pas gepromoveerden groot en konden wij rekenen op zo'n tien inzendingen. Het mes sneed hierbij aan twee kanten: de auteurs kregen de gelegenheid hun promotieonderzoek onder de aandacht te brengen van een breed fysisch publiek en het NTvN was verzekerd van een aantal interessante artikelen voor publicatie in het tijdschrift in de loop van het jaar.

Helaas bleek dit jaar de belangstelling onder pas gepromoveerden gering. De redenen hiervoor zijn niet duidelijk, maar een mogelijkheid is dat de eis dat het artikel in het Nederlands geschreven moet zijn een groot aantal gepromoveerden uitsluit. Binnen de redactie wordt nagedacht over manieren om het aantal inzendingen weer toe te laten nemen. Suggesties van lezers zijn hierbij natuurlijk welkom.

Vanwege het geringe aantal inzendingen heeft de redactie besloten dit jaar maar één prijs toe te kennen. Hierbij heeft de eis dat het artikel gepubliceerd moet kunnen worden zonder noemenswaardige aanpassingen een grote rol gespeeld. De jury, bestaande uit Peter Siegmund, Machiel Kleemans, Helko van den Brom en Coen Swarts, was unaniem van mening dat er maar één artikel in aanmerking kwam voor de eerste prijs, het artikel *Gemanipuleerd licht schijnt dwars door ondoorzichtige materialen* van Ivo Vellekoop, dat duidelijk voldoet aan de NTvN-prijsvraagrichtlijnen. Dit artikel laat zien dat door de fase van individuele segmenten van het licht aan te passen een lichtbundel dwars door een laagje witte verf kan schijnen. Enigszins verontrustend is wel dat het hiermee in de toekomst misschien mogelijk is om door allerlei materialen heen te kijken, dus de keizer draagt altijd nieuwe kleren.

De prijsuitreiking zal plaatsvinden tijdens Fysica 2009 op 24 april in Groningen.

Natuurlijk zijn hartelijke felicitaties voor Ivo hier op zijn plaats.

Coen Swarts
namens de prijsvraagcommissie