

Holografie voor beginners

Holografie maakt het mogelijk om van ruimtelijke voorwerpen schitterende driedimensionale optische afbeeldingen te maken. Deze kunnen erg tot de verbeelding spreken. Holografie is dan ook heel geschikt om de belangstelling voor optica te stimuleren. Uit het feit dat regelmatig vwo-leerlingen bij de TU aankloppen voor informatie over en praktische hulp bij het maken van hologrammen voor een 'eigen experimenteel onderzoek' blijkt, dat holografie ook in het onderwijs op de middelbare school een aantrekkelijk en zinvol studieonderdeel is. Dit artikel is bedoeld als een wegwijzer tot het maken van transmissiehologrammen van kleine voorwerpen, in een eenvoudige opstelling. Daartoe worden de basisprincipes van holografie beschreven en praktische aanwijzingen gegeven. *Jan de Jong*



J.deJong@TNW.TUdelft.NL

Jan de Jong (1942) studeerde technische natuurkunde aan de TH in Delft, waarna hij enige tijd leraar natuurkunde was bij het vwo en havo. Daarna was hij vele jaren werkzaam in de vakgroep Optica van de TU-Delft en deed de eerste jaren, deels als begeleider van afstudeerders en promovendi, onderzoek aan holografie en interferentieholografie, later aan optische golfgeleiders. Thans werkt hij in deeltijd bij de groep Natuurkundig Practicum van de faculteit Technische Natuurwetenschappen.

DE HOLOGRAFISCHE OPNAME

Holografie berust op een combinatie van interferentie en buiging. De opname is niets anders dan een fotografische registratie van het patroon dat ontstaat door interferentie van licht dat door een voorwerp verstrooid is met licht uit een zogenoemde referentiebundel, zie figuur 1. Buiging van licht aan dit patroon veroorzaakt het ontstaan van het beeld, zie verderop.

Als coherente lichtbron voor kleine voorwerpen en kleine hologrammen is een helium-neonlaser zeer geschikt. Het driedimensionale voorwerp mag op een willekeurige afstand van de holografische plaat (of film) staan. De referentiebundel wordt afgetakt van de bundel die het voorwerp verlicht. Het geeft kwalitatief en kwantitatief inzicht om dit interferentieverschijnsel te vergelijken met interferentie van twee evenwijdige bundels, zie figuur 2. Het interferentiepatroon in het overlappingsgebied bestaat hier uit onderling evenwijdige platte, equidistante lichte en donkere vlakken. Op een scherm S dat dit patroon doorsnijdt ontstaat dus een traliepatroon. Als de nor-

maal op S met beide voortplantingsrichtingen in één vlak ligt, is de periode p daarvan te berekenen met

$$p = \frac{\lambda}{|\sin \theta_b - \sin \theta_a|} \quad (1)$$

Hierin zijn θ_a en θ_b de invalshoeken van de bundels (in de figuur met verschillende tekens) en is λ de golflengte van het gebruikte licht.

Als één van deze bundels (of beide) niet evenwijdig is, zal nog steeds een interferentiepatroon ontstaan, maar dit zal een andere vorm hebben. In het algemene geval van figuur 1, met een diffuus reflecterend voorwerp, is het interferentiepatroon zeer grillig, ruisachtig. Anders dan op een fotografisch negatief, waarop meestal een verkleinde tweedimensionale projectie van een beeld staat, is op deze holografische opname niets van het voorwerp te herkennen. De informatie van elk voorwerpspunt is over het hele hologram verdeeld. Een hologram bevat dan ook als het ware een *codering* van het driedimensionale beeld.

Na het fotografisch ontwikkelen ontstaat hieruit een patroon van grijstinten. Meestal wordt dit patroon met een gewijzigd behandelingsprocédé gebleekt. Het patroon wordt daardoor omgezet in lokale verschillen in brekingsindex, wat uiteindelijk een lichtsterker holografisch beeld oplevert.

WEERGAVE OF RECONSTRUCTIE VAN HET HOLOGRAFISCHE BEELD

Een zeer goed gelijkend driedimensionaal beeld ontstaat als het hologram belicht wordt met een bundel die in vorm, richting en golflengte niet afwijkt van de bij opname gebruikte referentiebundel. Dit beeld ontstaat door buiging van deze reconstructiebundel aan het fijne interferentiepatroon in het hologram. Dit is als volgt op verrassend eenvoudige wijze begrijpelijk te maken met eenvoudige theorie van buiging aan tralies.

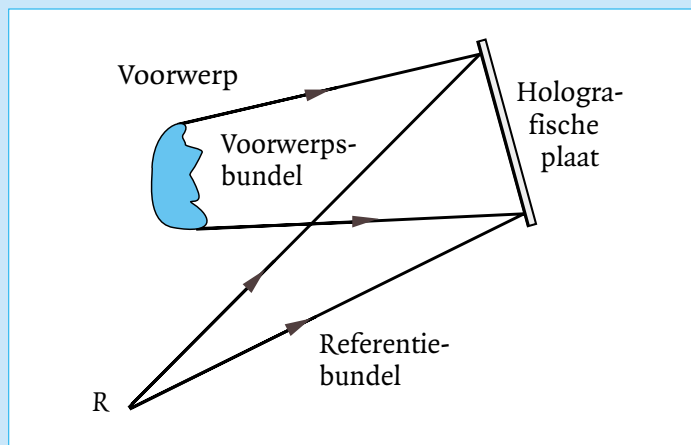
Een lijnentralie dat is opgenomen als interferentiepatroon van twee evenwijdige bundels zoals in figuur 2, kan licht in een aantal buigingsordes afbuigen. De richting Θ_m van de afgebogen bundel van de m -de orde volgt door substitutie van p uit vergelijking (1) in de tralieformule voor scheef invallend licht. Met λ' als golflengte en Θ als invalshoek van de invallende evenwijdige lichtbundel, levert dit

$$\sin \Theta_m = \sin \Theta + m \frac{\lambda'}{\lambda} p =$$

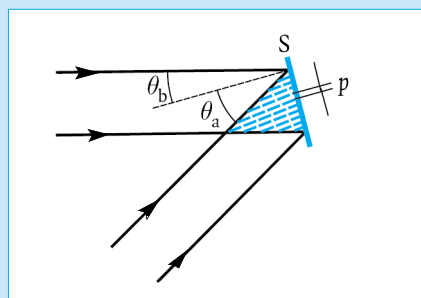
$$\sin \Theta + m \frac{\lambda'}{\lambda} (\sin \theta_b - \sin \theta_a) \quad (2)$$

Als nu $\lambda' = \lambda$ en hoek $\Theta = \theta_a$, volgt dat $\Theta_l = \theta_b$, zie figuur 3. Ook volgt dat Θ_{-l} gelijk is aan θ_a als $\Theta = \theta_b$. Belichting in de richting van één van de opnamebundels, doet dus o.a. een bundel in (het verlengde van) de richting van de andere opnamebundel ontstaan als de golflengte hetzelfde is. Bundels van hogere orde zijn meestal niet of slechts zwak aanwezig.

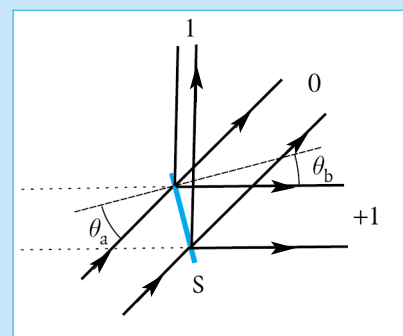
Zijn beide bundels bij opname afkomstig van een puntbron, zoals C en V in figuur 4, dan is het interferentiepatroon in elk klein gebiedje van de opname bij benadering een lijnentralie, maar met richting en periode die afhankelijk zijn van de plaats. De bovenstaande beschouwing geldt nu voor elk gebiedje van dit hologram. Als vanuit één van die puntbronnen, bijvoorbeeld C, de opname weer bestraald wordt, zal aan elk gebiedje van dat hologram, zoals bij P_1 en P_2 , een eersteorde bundeltje afgebogen worden dat uit de richting van de andere puntbron V lijkt



Figuur 1 Opname van een transmissiehologram. Op een fotogevoelige plaat wordt het patroon vastgelegd dat ontstaat door interferentie van de voorwerpsbundel met de referentiebundel.



Figuur 2 Interferentie in het overlappingsgebied van twee evenwijdige bundels met invalshoeken θ_a en θ_b . Op scherm S ontstaat een lijnentralie met periode p .



Figuur 3 Eén afgebogen bundel van de eerste orde heeft precies de richting θ_b als de bundel invalt onder de hoek θ_a .

te komen. Elke straal van de gehele uit-tredende bundel van die eerste orde wijst dus van V af, zodat er op die plaats een virtueel beeld van V in de ruimte ontstaat.

Verder is het oppervlak van een diffuus reflecterend voorwerp op te vatten als een verzameling van puntbronnen. Elk levert samen met de referentiebundel een eigen interferentiepatroon op. Het complete, ingewikkelde interferentiepatroon zoals dat in de holografische emulsie wordt vastgelegd, kan als superpositie van al die patronen worden beschouwd, elk met bovenbeschreven eigenschappen. Elk levert dan ook een beeldpunt op van het bijbehorende voorwerppunt, zodat uiteindelijk een virtueel beeld van het gehele voorwerp zichtbaar wordt. Het aldus *gedecodeerde* beeld is driedimensionaal en optisch identiek aan het voorwerp indien golflengte en plaats (divergentiepunt) van de reconstructiebron C hetzelfde zijn als van de referentiebron.

SCHEIDEND VERMOGEN EN AFBEELDINGSFORMULE

Om ieder deeltralie goed te kunnen registreren moet de fotografische emulsie een zeker minimaal *scheidend vermogen* hebben. De grootte daarvan volgt uit de kleinste voorkomende periode. Deze kan men berekenen met uitdrukking (1), door de invalshoeken te nemen van de lichtstraal uit R en van de straal uit het verst van R afgelegen voorwerppunt.

In een praktisch geval dat deze hoeken 30° resp. -12° zijn, en het licht afkomstig is van een helium-neonlaser met λ

$= 0,6328 \mu\text{m}$ volgt $p = 0,89 \mu\text{m}$. Voor holografie is dus zeer fijnkorrelig materiaal nodig, dat dan helaas ook relatief ongevoelig is voor licht.

Uit bovenstaande paragraaf is duidelijk dat verandering van plaats of golflengte λ' van de puntvormige reconstructiebron C een verandering van plaats en vorm van het beeld zal veroorzaken. Dus zal gebruik van een reconstructiebron van eindige afmetingen een onscherp beeld opleveren afhankelijk van de grootte en vorm van de lichtbron, en gebruik van wit licht eveneens door de dispersie. De grootten van dergelijke effecten kunnen berekend worden met de *afbeeldingsformules* van E.B. Champagne. Deze leggen een relatie tussen de positie van een willekeurig voorwerppunt V en het bijbehorende beeldpunt B.

$$\frac{1}{R_B} = \frac{1}{R_C} \pm \frac{\lambda'}{\lambda} \left(\frac{1}{R_V} - \frac{1}{R_R} \right) \quad (3)$$

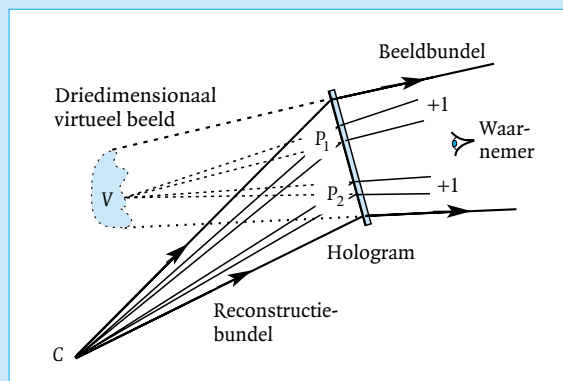
$$\frac{x_B}{R_B} = \frac{x_C}{R_C} \pm \frac{\lambda'}{\lambda} \left(\frac{x_V}{R_V} - \frac{x_R}{R_R} \right) \quad (4)$$

De uitdrukking voor de y-coördinaten volgt uit formule 4 door in elke term x te vervangen door y. Het x,y-vlak van het assenstelsel valt hier samen met het hologramvlak, met de oorsprong in het midden van het hologram, zie figuur 5. R_i is de afstand van het door de index i aangeduide punt tot de oorsprong, maar voorzien van het teken van de z-coördinaat van dat punt. C is de positie van de reconstructiebron, B van het beeldpunt. Formule 3 is vergelijkbaar met de paraxiale lensformule,

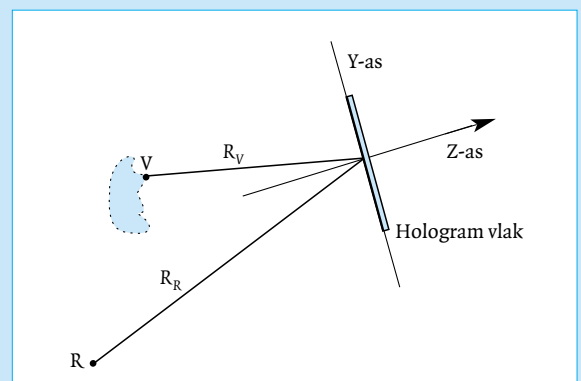
formule 4 met formule 2. Het \pm -teken duidt op de twee mogelijke eerste orde beelden. Het $+$ -teken levert het best gelijkende beeld, zoals blijkt door substitutie van $R_C = R_R$ en $\lambda' = \lambda$. Het tweede beeld is gepuntspiegeld en vergroot of verkleind en meestal vervormd. Dit beeld wordt meestal pas zichtbaar als het hologram om een verticale as enigszins gedraaid wordt. Als z naar links negatief gekozen wordt, zullen R_V , R_R en R_C in figuur 5 negatief genomen moeten worden. Een positieve uitkomst voor R_B duidt dan op een reëel beeld.

OPSTELLING EN VERDERE PRAKTISCHE AANWIJZINGEN

Figuur 6 geeft een voorbeeld van een eenvoudige opstelling, te bouwen op een oppervlak van minimaal 100 x 50 cm. De helium-neonlaser kan het beste een gaussische intensiteitsverdeling dwars op de bundel hebben, maar hoeft meestal niet gepolariseerd te zijn. Het vereiste bundelvermogen hangt af van de gevoeligheid en afmetingen van het holografisch materiaal, grootte en reflectiviteit van het voorwerp en van verdere lichtverliezen in de opstelling. Bij gebruik van holografisch materiaal met een gevoeligheid van $100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ en afmetingen van 6,3 x 6,3 cm, en goed licht verstrooiende voorwerpen van 5 tot 10 cm, is minimaal 5 mW nodig. De vereiste belichtingstijd ligt daarmee al gauw in de grootteorde van één of meer minuten. De opstelling moet gebouwd worden op een interferometrisch stabiele ondergrond en met stabiele componenten. Als deelspiegel kan een ge-



Figuur 4 Het ontstaan van een driedimensionaal beeld is op te vatten als superpositie van de eersteorde bundeltjes van alle deeltralies, zoals P₁ en P₂.



Figuur 5 Definitie van het xyz-coördinatenstelsel en de afstanden zoals R_V van een voorwerppunt en R_R van de referentiebron voor gebruik in de afbeeldingsformules van Champagne.

woon stukje glas dienen, mits de door- gaande bundel gebruikt wordt om het voorwerp te verlichten, en de gereflec- teerde bundel als referentiebundel. Met twee (liefst oppervlakte-) spiegels heeft men voldoende flexibiliteit om zowel voorwerp als hologram vanuit de gewenste richtingen te verlichten. Het hologram moet door de referentie- bundel gelijkmatig verlicht worden, en het voorwerp naar wens, zoals men het, gezien door de rand van de holo- gramrechthoek, mooi vindt. Dit legt voorwaarden op aan sterkte en positie van de bundelverbreedende lenzen. Door hiervoor microscoop-objectieven van minimaal 20x te gebruiken, kun- nen de afstanden kort blijven.

Verder moet erop gelet worden dat het verschil tussen de optische wegen van de twee bundels, gerekend vanaf de deelspiegel via spiegel en voorwerp tot het hologram, niet meer is dan zo'n 5 cm. Dit in verband met de eindige co- herentie van het laserlicht.

Voor een goede ruisvrije opname moet vanuit het hologram gezien, de hoek- afstand van de referentiebundel tot het voorwerp minstens zo groot zijn als de hoekbreedte (gezichtsveldhoek) van het voorwerp.

Voor het meten van de intensiteiten in $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ is een absolute stralingsmeter handig, maar men kan volstaan om met een fotografische belichtingsme- ter de intensiteitsverhouding tussen voorwerps- en referentiebundel ter plaatse van het hologram te bepalen. De referentiebundel ter plaatse van het hologram moet 3 tot 10 maal zo sterk zijn als de voorwerpsbundel. Indien nodig kan met een grijsfilter of een ge-

schikt stukje donker negatief de relatief te sterke bundel van de twee, verzwakt worden. Als "sluiter" kan een stuk zwart karton gebruikt worden om met de hand de laserbundel te blokkeren, en een stopwatch of eierwekker om de tijd te meten. De beste belichtingstijd kan worden bepaald door één holo- gram in een aantal stroken of sectoren met verschillende tijden te belichten.

Een probleem is vaak het optreden van vlekken in de bundels als gevolg van buiging van het zeer coherente laser- licht aan stofjes, krasjes en vlekken op lenzen of spiegels. Schoon werken (nooit met de vingers de optiek aanra- ken) is dus belangrijk. Voor verdere de- tails, beschrijving van talloze variaties van opnametechnieken en toepassin- gen van de holografie, zie het veel om- vattende, op de praktijk gerichte boek van G. Saxby [1]. Zie verder, ouder, maar diepergaand, H.J. Caulfield [2].

HOLOGRAFISCH MATERIAAL

Voor gebruik bij de golflengte van de helium-neonlaser is heel geschikt het bekende film- en plaatmateriaal Holo- test van Agfa-Gevaert. Hiervan is voor transmissiehologrammen het type 10E75 voldoende, met de hoge gevoe- ligheid van $5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. Beter is 8E75 met kleinere korrel, en gevoeligheid van $60 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. De Holotest materialen worden echter niet meer geprodu- ceerd. Wel leverbaar [3] zijn: BB-640, minder gevoelig ($500 \mu\text{J}/\text{cm}^2$), maar door de kleinere korrel betere resulta- ten, en het nieuwe, gevoeliger materi- aal BB-640-ES ($100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$). Deze zijn zowel op verschillende formaten glas als op film leverbaar. De belichtingen

mogen aanzienlijk groter zijn dan de genoemde waarden, maar niet veel kleiner.

Ook komt in aanmerking het PFG-or materiaal van Slavich [4], dat kwalita- tief in de buurt zou komen van Holo- test 8E75. Eigen voorlopige experi- menten (op glasplaten van $6,3 \times 6,3$ cm) wijzen op een optimale belichting van rond $125 \mu\text{J}/\text{cm}^2$.

ONTWIKKEL- EN BLEEKPROCÉDÉ

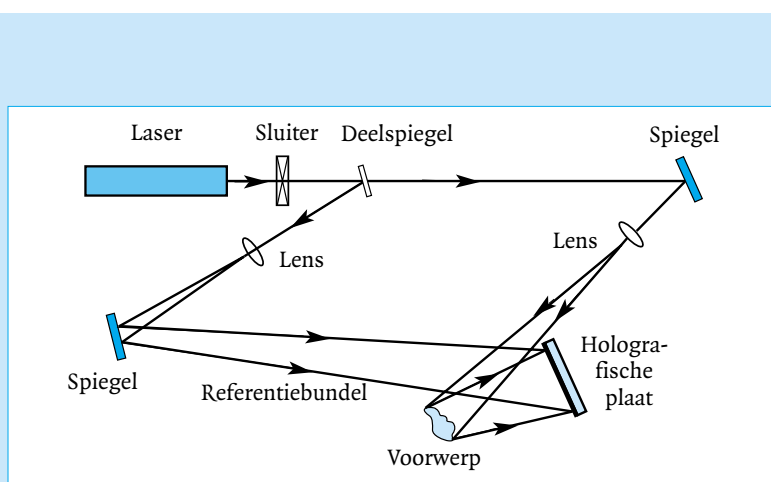
Een goed werkend ontwikkel- en bleekprocédé [5] is het volgende.

Maak drie oplossingen in gedeminera- liseerd water,

- als ontwikkelaar deel A:
Pyrogallol, 10 g/l;
- als ontwikkelaar deel B:
Soda, watervrij 50 g/l met Natrium- hydroxide (NaOH), 15 g/l;
- als bleekbad:
Zwavelzuur, 10 ml/l met kaliumdi- chromaat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), 6 g/l.

Ontwikkel als volgt.

- Meng kort (max. 10 min.) vóór het ontwikkelen deel A met deel B, bijv. 50 ml van elk.
- Ontwikkel de hologramplaat hierin en beweeg deze nu en dan, geduren- de ongeveer 4 minuten;
- Spoel daarna de plaat 3 minuten in schoon water;
- Bleek vervolgens gedurende 2 minu- ten;
- Spoel 3 minuten;
- Laat tenslotte de plaat drogen.



Figuur 6 Schets van een bruikbare opstelling voor het opnemen van een transmissie- hologram.

REFERENTIES

- 1 G. Saxby, *Practical Holography*, Prentice Hall, New York, 1994, 2nd ed.
- 2 H.J. Caulfield (ed.), *Handbook of Optical Holography*, Academic Press, New York, 1979.
- 3 Holographic Recording Technologies GmbH, Steinau, Duitsland. Op hun internetsite: www.hrt-gmbh.de is uitvoerige informatie te vinden. Kort geleden echter gestopt met productie, zie hun internetsite. Een Londens bedrijf zal het voortzetten. Importeur: Dutch Holographic Laboratory, Eindhoven, e-mail: Walter@holoprint.com.
- 4 Uitvoerige informatie te vinden op: www.slavich.com.
- 5 Aanbevolen door Walter Spiering, zie hier- boven [3]. Zelf heb ik hier op het Natuurkundig Practicum ook goede ervarin- gen mee, bij gebruik van o.a. Holotest 10E75 en 8E75.