



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **It's just a phase: high-contrast imaging with patterned liquid-crystal phase plates to facilitate characterization of exoplanets**

Doelman, D.S.

### **Citation**

Doelman, D. S. (2021, June 22). *It's just a phase: high-contrast imaging with patterned liquid-crystal phase plates to facilitate characterization of exoplanets*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3191978>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3191978>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <https://hdl.handle.net/1887/3191978> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Doelman, D.S.

**Title:** It's just a phase: high-contrast imaging with patterned liquid-crystal phase plates to facilitate characterization of exoplanets

**Issue Date:** 2021-06-22

## 9 | Nederlandstalige samenvatting

In ons zonnestelsel draaien acht planeten en vijf dwergplaneten rond de zon. Hoewel ze vanaf het aardoppervlak niet allemaal zichtbaar zijn met het blote oog, hebben ze sinds de oudheid al vele mensen geïnspireerd en hebben velen ze geobserveerd. Een van die mensen is de briljante Nederlandse wetenschapper Christiaan Huygens. Naast grote ontdekkingen in de wiskunde en natuurkunde, ontdekte hij met zijn zelfgemaakte telescoop Titan, de maan van Saturnus, en liet hij zien dat de ringen van Saturnus niet vastzaten aan Saturnus zelf en dus echte ringen waren. Zijn observaties van de andere planeten hebben hem in de laatste jaren van zijn leven aangezet om te werken aan een boekje van een meer filosofische aard genaamd *Cosmotheoros*. Hierin betoogt Christiaan Huygens, net als velen voor hem, dat er ook planeten, met manen, rond andere sterren draaien. Maar wat hem anders maakt dan vele voorgangers, is de gedachte dat wij deze planeten niet zouden kunnen zien omdat ze niet te onderscheiden zijn van hun ster. In feite dacht hij dus al na over een methode voor het ontdekken van exoplaneten, en zelfs over het karakteriseren van deze planeten. In *Cosmotheoros* betoogt hij namelijk ook dat er leven is op de andere planeten omdat er ook vloeibaar water zou zijn (met aangepaste eigenschappen om niet te bevriezen of verdampen), gebaseerd op het zien van donkere vlekken op het oppervlak van de planeten in ons zonnestelsel. We zouden Christiaan Huygens kunnen beschouwen als een pionier op het gebied van exoplaneetwetenschap.

Nu, meer dan 300 jaar na zijn dood, is het criterium dat vloeibaar water nodig is voor leven nog steeds belangrijk bij onze zoektocht naar buitenaards leven. Al is de redenatie voor de locatie van vloeibaar water omgedraaid, dus dat alleen op een bepaalde afstand van de zon water vloeibaar is en dus alleen daar leven zou kunnen ontstaan, i.e. de bewoonbare zone. Bovendien is het tegenwoordig wel mogelijk exoplaneten kunnen vinden, in tegenstelling tot de bewering van Huygens, door de extreme technologische vooruitgang en het ontstaan van andere methodes om exoplaneten te detecteren. Deze methodes zijn indirecte methodes, waarbij door precieze metingen aan de ster kan worden afgeleid dat er exoplaneten omheen moeten draaien. Sinds het vinden van de eerste twee exoplaneten in 1992 door Wolszczan and Frail en de eerste planeet rond een hoofdreeks ster in 1995 door Mayor and Queloz, zijn er al meer dan 4300 planeten gevonden. Doordat verreweg de meeste zijn ontdekt met indirecte methodes weten we vaak niet heel veel van deze planeten. Veel meer dan de omlooptijd, de diameter, de massa (en dus dichtheid) zijn vaak niet te achterhalen. Om te ontdekken of er leven is op deze planeten zullen we ze direct moeten bekijken, dus hun licht ontwarren uit het sterlicht, en dat analyseren. We zullen dus de uitdagingen die Christiaan Huygens al voorzag moeten overkomen.

### Het fotograferen van een planeet

De planeet aarde is ongeveer tien miljard keer minder helder dan de zon in zichtbaar licht als je van een afstand kijkt. Ook staat de planeet dichtbij de ster,

zodat de hoekscheiding heel klein is. Als je vanaf het dichtstbijzijnde gebied waar stervorming plaatsvindt zou kijken naar de zon en de aarde, is de hoekscheiding tussen hen vier keer kleiner dan de grootte van een sesamzaadje op een broodje in Den Haag, gezien vanaf het dak van het Huygens gebouw in Leiden. Het is helaas niet zomaar mogelijk om het licht van een planeet te ontwarren van het licht van de ster. Telescopen hebben een eindige resolutie door het golfkarakter van licht, waardoor het licht van een puntbron wordt verspreid over een oppervlak. Het oplossend vermogen van een telescoop, de minimale hoekscheiding die kan worden waargenomen, hangt af van de diameter van de spiegel en de golflengte waarop je meet. Hierbij hebben grotere telescopen een groter oplossend vermogen en kan je dichterbij de ster kijken in het visueel dan in het infrarood. Voor de huidige generatie telescopen met een spiegel diameter van ongeveer 8 meter, is het waarnemen van een aardachtige planeet nog buiten bereik. Bovendien worden deze telescopen gelimiteerd door de turbulentie in de atmosfeer, die het sterlicht uitsmeert over de camera.

Om deze moeilijkheden te overkomen heeft een instrument dat afbeeldingen maakt van planeten, een *high-contrast imaging system*, meerdere complexe onderdelen. Deze onderdelen staan afgebeeld in Fig. 9.1. Het eerste onderdeel is een *adaptief optisch systeem*. Het doel van dit systeem is het opheffen van optische aberraties die worden gecreëerd door bijvoorbeeld de atmosfeer, trillingen, of polijstfouten van lenzen en spiegels. Het systeem meet de aberraties met een sensor die vervolgens, na berekeningen met de computer, een spiegel aanstuurt die kan vervormen. Voor telescopen op Aarde moet het meten en vervormen van de spiegel heel snel om de turbulentie op te heffen, tot wel 3000 keer per seconde. Voor telescopen in de ruimte hoeft de correctie niet zo snel, maar het is wel nodig voor het corrigeren van aberraties van het instrument zelf. Het nadeel van telescopen in de ruimte is dat ze door de kosten kleiner zijn en dus een kleiner oplossend vermogen hebben. Het tweede onderdeel van het instrument is de *coronagraaf*. Het doel van de coronagraaf is het wegfilteren van het sterlicht en om zoveel mogelijk planeetlicht door te laten. Dit kan bijvoorbeeld door een kleine ronde zwarte schijf te plaatsen op de plek waar de ster staat, terwijl het licht van de planeet ernaast wordt afgebeeld. Ook zijn er coronagrafen die juist gebruik maken van het feit dat licht een golf is en het zo aanpassen dat het sterlicht zichzelf opheft (destructief interfereert). De optimale keuze voor een coronagraaf hangt af van vele factoren, zoals de hoeveel sterlicht ze wegfilteren, hoeveel planeetlicht ze doorlaten, de minimale hoekafstand waarop nog planeetlicht doorlaten en bij welke golflengtes (kleuren) ze werken.

De coronagraaf kan ook vervangen worden door een masker die de telescoop tot een interferometer maakt door een groot deel van het licht tegen te houden, behalve op de plekken waar kleine gaten zitten. Het licht van verschillende plekken op de telescoopspiegel dat wordt doorgelaten door het masker, wordt gecombineerd op dezelfde plek in een afbeelding, waarbij de samen- of tegenwerking van verscheidene golven een patroon maakt. Deze techniek heet *Apertuursynthese*. Uit het patroon van golven kan informatie worden gehaald over het object dat wordt bekeken door de telescoop. Het nadeel van deze techniek is dat je het overgrote gedeelte van het licht weggooit, maar daar krijg je twee belangrijke voordelen voor

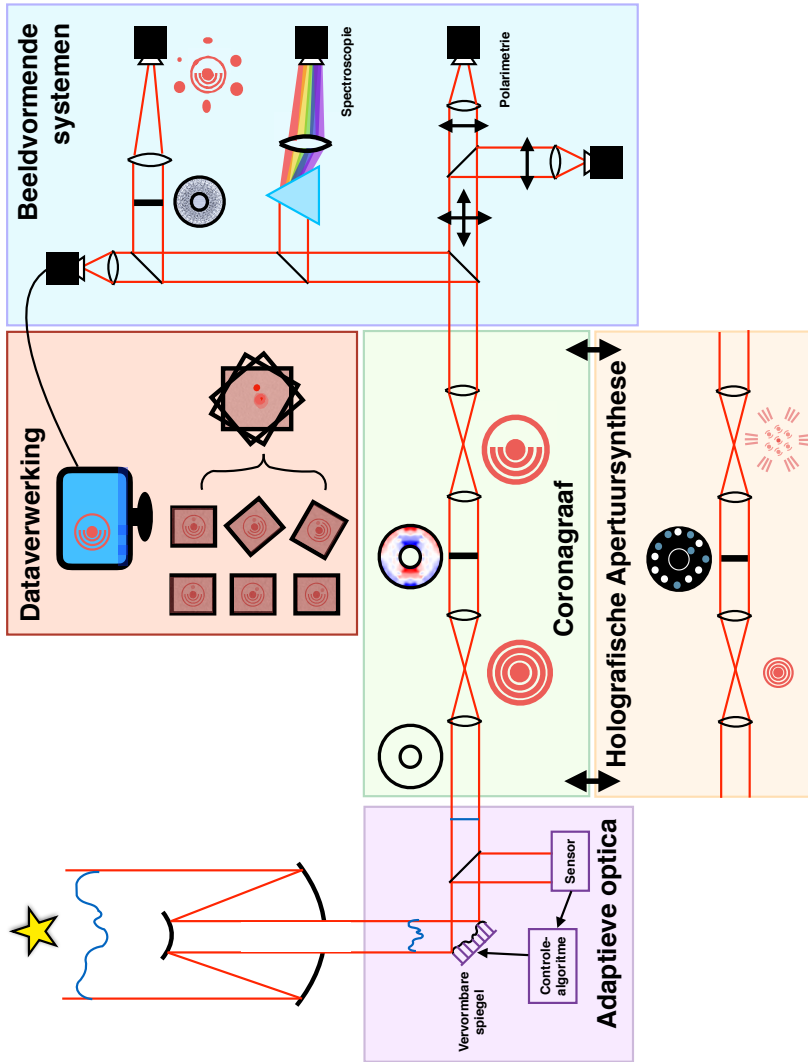


Figure 9.1: Schema van een high-contrast imaging system, met vijf modules die gecombineerd worden om het direct fotograferen van exoplaneten mogelijk te maken.

terug. Ten eerste is de gevoeligheid voor optische aberraties en turbulentie een stuk kleiner, omdat je de faseverschillen tussen gaten kan kalibreren. Bovendien is het oplossend vermogen van de telescoop door deze techniek twee keer zo groot. Dit komt omdat je de verschuiving van de golven met een halve periode al goed kan waarnemen. Het grotere oplossend vermogen en de verminderde gevoeligheid voor optische aberraties zorgen ervoor dat deze techniek beter werkt dan een coronagraaf bij de kleinste hoekscheiding.

Het derde onderdeel bestaat uit *beeldvormende systemen*, waarmee verschillende eigenschappen van het licht van de planeten kunnen worden gemeten. Zo kunnen we aan het *spectrum*, de intensiteit van het licht per golflengte (kleur), de temperatuur afleiden van de planeet, iets zeggen over welke moleculen voorkomen in de atmosfeer en of er wolken zijn. Uit de voorkeursrichting van de trilling van het licht, *polarisatie*, kunnen we meer te weten komen over stof in de atmosfeer, of een planeet zelf snel ronddraait, of er een niet uniform wolkendek is, of dat er een grote stofschiif om de planeet draait. Deze kunnen zelfs gecombineerd worden (spectropolarimetrie), om oceanen te detecteren of misschien zelfs leven. Tot slot kunnen we met gewone afbeeldingen ook kijken naar de verandering in de tijd.

De correctie met adaptieve optica is niet perfect, waardoor de coronagraaf niet optimaal werkt en er toch sterlicht op de camera valt. Met het laatste onderdeel, *digitale dataverwerking*, kunnen we toch een deel van van dit sterlicht nog weghalen. Hierbij combineren we de afbeeldingen op een manier waarbij het overgebleven sterlicht en ruis van de camera zo veel mogelijk wordt weggehaald, en het licht van de planeet onaangetast blijft. Zo kun je bijvoorbeeld een andere gelijkaardige ster waarnemen die geen planeet heeft en deze als referentie gebruiken. Ook kun je de ster als referentie voor zichzelf gebruiken omdat de oriëntatie van een planeet ten opzichte van de ster verandert door de rotatie van de hemel door de draaiing van de aarde. Bovendien helpen spectroscopie als polarimetrie ook met het weghalen van overgebleven sterlicht. Maar dit sterlicht heeft een ander spectrum en het trilt niet in een voorkeursrichting (het is ongepolariseerd). Dus kunnen de verschillen worden gebruikt om extra te sterlicht te filteren.

## Planeten karakteriseren

Met een combinatie van de voorgenoemde technieken, is het mogelijk om exoplaneten direct waar te nemen. Met de huidige technieken en telescopen zijn we gelimiteerd door de turbulentie en het oplossend vermogen, waardoor we alleen net gevormde (en dus warme) gasreuzen in de buitenste gebieden van zonnestelsels kunnen afbeelden. Maar door de snel verbeterende techniek is er al heel veel bekend over deze planeten. Een mooi voorbeeld is het 30 miljoen jaar oude systeem HR 8799, bestaande uit een ster met (minimaal) vier gasreuzen. In Fig. 9.2 staan voorbeelden van metingen uit de literatuur. De planeten staan tussen de 15 en 70 keer zo ver weg als de aarde van de zon staat, en de planeten zijn ongeveer zeven keer zo zwaar als Jupiter. De planeten zijn nog warm van de formatie, rond de 1200 graden Kelvin. Sinds de ontdekking van de buitenste drie planeten in

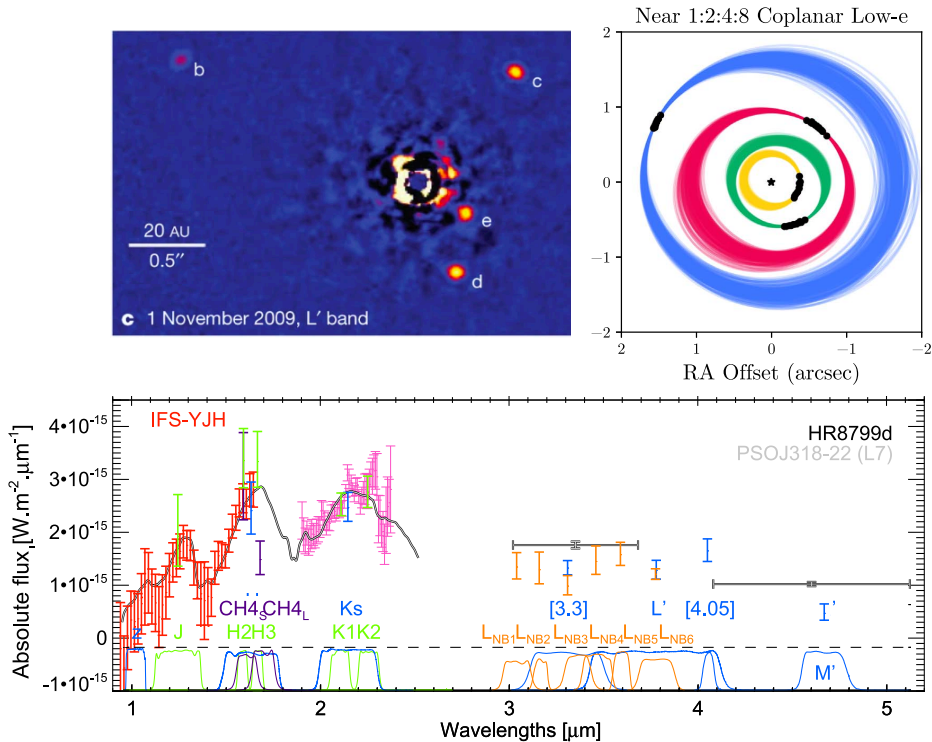


Figure 9.2: Geselecteerde resultaten van verschillende studies van het HR 8799 systeem. *Linksboven*: Afbeelding van het systeem waarbij alle vier de planeten zichtbaar zijn (Marois et al. 2010). *Rechtsboven*: Mogelijke banen van de vier planeten, gebaseerd op de zwarte meetpunten en de voorwaarde dat het systeem stabiel moet zijn (Wang et al. 2018). *Beneden*: Het spectrum van de 2e planeet van binnen, HR 8799 d, gemeten met verschillende instrumenten. In het grijs is het gemeten spectrum van een vergelijkbare vrijstaande bruine dwerg (Bonnetfoy et al. 2016).

2008 en de binnenste in 2010 zijn ze heel veel geobserveerd. Daardoor is hun baan rond de ster met grote precisie bepaald. Door te kijken naar het spectrum van de planeten, is er ontdekt dat er water, methaan en koolstofmonoxide in de atmosfeer zit, en dat de atmosfeer bestaat uit een dik wolkendek. We weten uit modellen dat het wolkendek verdwijnt naarmate de planeet afkoelt, en dus is er ook veel onderzoek gaande naar het karakteriseren van het wolkendek. Uit precisie metingen van polarisatie en metingen van variabiliteit in de hoeveelheid licht die ze uitstralen zijn nog geen conclusies gekomen, behalve wat limieten voor extreme structuren. Tot slot weten we uit de grootte van de stofschijf om de ster en de verhoudingen van koolstof en zuurstof in de atmosfeer van de planeten, dat de planeten zeer waarschijnlijk niet zijn ontstaan op de plek waar ze nu bewegen, maar juist verder naar buiten.

## Vloeibare-kristaltechnologie

Om nog meer te leren over planeten moeten de huidige systemen worden verbeterd. Een grote rol kan hierin worden vertaald door de integratie van de eerdergenoemde subsystemen van een high-contrast imaging system. Dit vraagt om optica waarmee je het sterlicht kan met grote precisie kan manipuleren om functionaliteit toe te voegen. Verder leren we veel over waargenomen planeten door naar hun spectrum te kijken. Dus is het belangrijk om optica te hebben die voor veel kleuren tegelijkertijd goed werken. Beide eigenschappen komen samen in optische componenten gemaakt met vloeibare-kristaltechnologie. Met deze technologie is het mogelijk om een heel gedetailleerd patroon te schrijven om het licht te manipuleren. Deze manipulatie gebeurt met de *fase* van lichtgolven, waarbij je de golven kort vertraagd ten opzichte van elkaar. Bij vloeibare-kristaltechnologie is deze vertraging, in tegenstelling to bijvoorbeeld optica van glas, niet afhankelijk van de kleur. De vertraging hangt namelijk alleen af van de lokale oriëntatie, of *geometrie*, van de vloeibare kristallen. Deze vertraging heet daarom ook wel *geometrische fase*.

En optische component met vloeibare-kristaltechnologie wordt gemaakt in twee stappen. Ten eerste wordt er een dunne laag fotopolymeriseerbaar polymeer aangebracht op een plat substraat die gevoelig zijn voor de trilrichting (polarisatie) van inkomend ultraviolette straling. Door met een uv-laser het oppervlak te scannen en tegelijkertijd de polarisatie aan te passen kan bijna elk patroon worden gemaakt. Dit patroon kan na het vastleggen niet meer worden veranderd. Bij de tweede stap worden er andere vloeibare kristallen aangebracht die zich oriënteren aan de hand van de laag eronder, die ook hard worden gemaakt met uv-straling. Deze extra laag of lagen van vloeibare kristallen bepalen de fractie van het licht dat de fase verschuiving krijgt. Deze fractie is met de huidige technologie erg hoog (> 96%) voor grote spectrale bandbreedtes (al het zichtbaar licht of nabij-infrarood). Het licht wat niet deze fase verschuiving krijgt, *polarisatielekkage*, gaat door de optische component bijna alsof het er niet was. Dit licht is meestal ongewild en kan verhinderen dat we planeten vinden. Een andere eigenschap van deze optische componenten van vloeibare-kristaltechnologie is dat sterlicht zowel



een positieve fase verschuiving als een negatieve fase verschuiving krijgt. Voor veel van de toepassingen van vloeibare-kristaltechnologie voor het waarnemen van planeten die worden besproken in dit proefschrift zijn deze twee eigenschappen een limiterende factor of juist een voordeel.

## Dit proefschrift

Het doel van dit proefschrift is het gebruiken van de sterke punten van vloeibare-kristaltechnologie voor het integreren van subsystemen in een high-contrast imaging system, om zo een betere karakterisatie van exoplaneten te faciliteren. Hiervoor maken we gebruik van de mogelijkheid om hoge-resolutie patronen te schrijven die kleuroafhankelijke fase aanbrengen met een hoge efficiëntie, om optische componenten te maken met verbeterde of nieuwe eigenschappen.

In hoofdstuk 2 bespreken we het ontwerpen, maken, installeren, verifiëren en eerste proefwaarnemingen met de vector-Apodizing Phase Plate (vAPP) coronagraaf voor zes verschillende telescopen. Vijf daarvan zijn geproduceerd in de laatste vier jaar. Deze vAPP coronagrafen zijn geoptimaliseerd voor verschillende golflengtes en het totale bereik van de instrumenten beslaat 550 nanometer (groen) tot 5 micrometer (infrarood). Een deel van deze coronagrafen is aangepast om optische aberraties te meten die worden geïntroduceerd door het instrument zelf. Ook zijn er soms zwakkere kopieën van het sterlicht toegevoegd om betere calibratie te doen van het licht van de planeet. Tot slot beschrijven we het ontwerp van de vAPP coronagrafen voor twee instrumenten voor de nieuwe generatie Extremely Large Telescope die momenteel wordt gebouwd en een spiegel diameter zal krijgen van 39 meter.

In hoofdstuk 3 gebruiken wij een van deze coronagrafen, geïnstalleerd in het LMIRCam instrument in de Large Binocular Telescope, voor het waarnemen van de binnenste drie planeten van het systeem HR 8799. Dit instrument heeft een speciale spectrograaf die afbeeldingen maakt, en voor elk punt in de afbeelding ook het spectrum meet. De combinatie van het grote spectrale bereik van deze spectrograaf en de coronagraaf, die onafhankelijk van golflengte werkt, geeft een unieke kijk op het HR 8799 systeem. Uit de observaties halen we namelijk de eerste lage-resolutie middeninfrarode spectra (3.5 tot 4.1 micrometer) van deze planeten. Deze spectra zijn volledig vlak en consistent met photometrische metingen van Br $\alpha$  (4.05 micrometer) die worden vermeld in de literatuur. Een mogelijke verklaring voor onze metingen is dat de wolken in de atmosfeer van de drie planeten opgebroken zijn.

In hoofdstuk 4 introduceren we een nieuwe methode om de technische beperkingen die polarisatielekkage veroorzaken te overkomen. Coronagrafen die worden gemaakt met vloeibare-kristaltechnologie worden gelimiteerd door deze lekkage omdat deze helderder is dan het licht van planeten. De nieuwe methode combineert het patroon van een coronagraaf met een extra traliepatroon, bijeengevoegd met nog één of meerdere substraten met ook een traliepatroon. Met deze methode kan de polarisatielekkage met meerdere orders van grootte verkleind worden

over een groot spectraal bereik. In het lab laten we zien dat voor een simpele twee-tralie combinatie de lekkage kunnen verkleinen met drie orders van grootte voor een golflengte van 532 nm en een factor 10 over een spectrale bandbreedte van 133 nm. Verder laten we met simulaties zien dat de lekkage drie orders van grootte kleiner kan worden met een complexere twee-tralie coronagraaf voor een spectraal bereik tussen de 1-2.5 micrometer, of zelfs zes orders van grootte voor een drie-tralie ontwerp.

In hoofdstuk 5 en 6 laten we zien dat de vloeibare-kristaltechnologie ook gebruikt kan worden voor het verbeteren van de maskers die worden gebruikt voor apertuursynthese. Doordat gaten in het masker op unieke plekken moeten zitten, passen er maar een gelimiteerd aantal gaten op het masker die daardoor weinig licht doorlaat. In hoofdstuk 5 presenteren wij het nieuwe idee van holografische apertuursynthese. Door een masker te maken dat meer gaten heeft die worden afgebeeld op een andere plek op de camera met een vloeibaar kristaloptiek, blijven de combinaties uniek terwijl je wel meer licht doorlaat. Deze nieuwe combinaties van gaten worden afgebeeld in holografische interferogrammen waarvan de plek van afbeelden verandert als functie van golflengte. Hierdoor kunnen we lage-resolutie spectroscopie doen zonder een aparte spectrograaf nodig te hebben. In hoofdstuk 6 bespreken we het ontwerp en fabricage van twee holografische apertuursynthese maskers voor de OSIRIS imager van de Keck telescoop. Bovendien beschrijven we de resultaten van de kalibratie in het lab en de eerste metingen van de dubbelster HDS 1507. Uit deze metingen halen we een hoekscheiding van  $120.9 \pm 0.5$  milli-boogseconde, die constant is als functie van golflengte.

In hoofdstuk 7 presenteren we de verbeterde versie van de Zernike wavefront sensor (ZWFS). Deze sensor is de meest efficiënte sensor voor het meten van optische aberraties met grote precisie. Onze versie, de vector-Zernike wavefront sensor (vZWFS) die wordt gemaakt met vloeibare-kristaltechnologie, is in staat om niet alleen aberraties in het golfvront (fase) te meten, maar tegelijkertijd ook amplitudeverschillen. Door het tegelijkertijd meten van zowel de fase als amplitude heeft de sensor geen last van veranderingen in de amplitude, iets wat bij de gewone ZWFS tot foute metingen kan leiden. Bovendien werkt de vZWFS sensor ook voor een groter spectraal bereik, waardoor er meer licht kan worden gebruikt voor de meting.

In hoofdstuk 8 introduceren we een nieuwe methode om met vloeibare-kristaltechnologie meerkleurige hologrammen te maken. Dit is mogelijk door het licht te scheiden per kleur met een polarisatie tralie en vervolgens per kleur het licht aan te passen met een patroon dat is gecombineerd met dezelfde tralie. Omdat het patroon anders is per kleur kunnen we corrigeren voor de diffractie, die patronen groter maakt voor grotere golflengten, en zelfs elke kleur een compleet andere afbeelding laten maken. We laten tot slot ook zien dat deze methode kan worden toegepast om vAPP coronagrafen te maken die twee keer zo efficiënt zijn.