

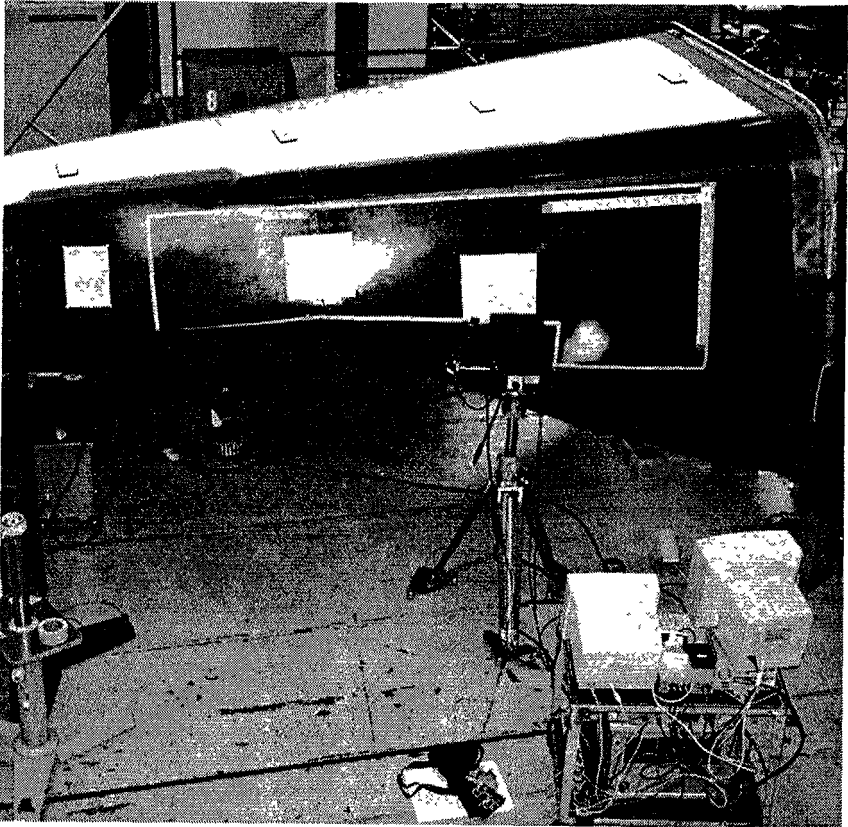
# Meerkanaals interferometer voor defectdetectie

*A.L. Weijers, H. van Brug en H.J. Frankena  
Optics Research Group, Department of Applied Physics  
Delft University of Technology*

## Inleiding

In het kader van een promotie-onderzoek is een real time fasegestapte shearing spikkelinterferometer ontwikkeld. Met dit systeem kunnen defecten gedetecteerd

worden in o.a. composiet materialen. Zulke materialen worden steeds populairder in de vliegtuigindustrie. Uit veiligheidsoverwegingen moeten deze materialen regel-



**Figuur 1**  
Interferometer inspecteert een stuk helicopter

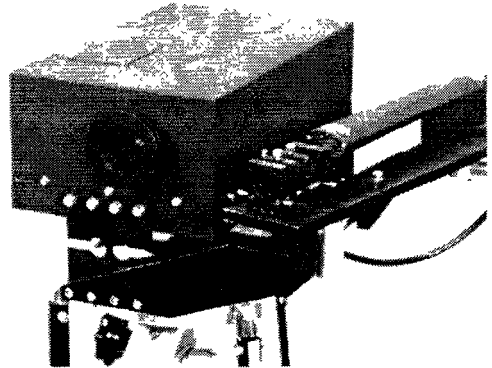
matig getest worden op mogelijke defecten, zoals delaminaties en inslagshades. Inspecties moeten plaatsvinden aan het vliegtuig en daarom moet een inspectiesysteem geschikt zijn om onder industriële omstandigheden te kunnen werken. Daarnaast heeft een contactloze techniek de voorkeur. Om fysiek contact tussen object en meetsysteem te voorkomen, kunnen optische technieken gebruikt worden. Daarbij dragen electromagnetische golven de informatie van het voorwerp over.

We hebben een optisch inspectiesysteem ontwikkeld, zodat er contactloos gemeten kan worden. Een relatief groot oppervlak kan in één keer geïnspecteerd worden (ongeveer  $25 \times 35 \text{ cm}^2$ ). Dit kan een belangrijke tijdswinst geven vergeleken met de huidige inspectiemethode: ultrasone detectie.

Deze techniek registreert ultrasone reflecties en transmissies. Het is een betrouwbare techniek, maar het heeft een heel klein inspectiegebied (orde grootte mm's) en moet daarom gescand worden over het oppervlak. Bovendien is meestal water nodig als koppelingsvloeistof en is vaak demontage van een te inspecteren voorwerp vereist. Voor deze toepassingen zouden interferometrische technieken een alternatief kunnen vormen. Interferometrische methoden meten objectvervormingen als faseveranderingen van het licht van de bron via een object naar de betreffende detector. Deze technieken zijn contactloos en zijn geschikt om voorwerpsverplaatsingen veel kleiner dan de golflengte van het gebruikte licht te detecteren. De vervorming van een voorwerp t.g.v. een aanslagmethode, bijv. verwarming, kan gemeten worden door de verandering in de faseverdeling voor en na de aanslag te meten.

Conventionele spikkelinterferometers zijn extreem gevoelig voor externe veranderingen, zoals bijvoorbeeld luchtstromingen of trillingen. Dit verhindert het gebruik van deze methoden in een typische industriële omgeving. Shearografie echter is wel geschikt voor gebruik in ruwe omstandig-

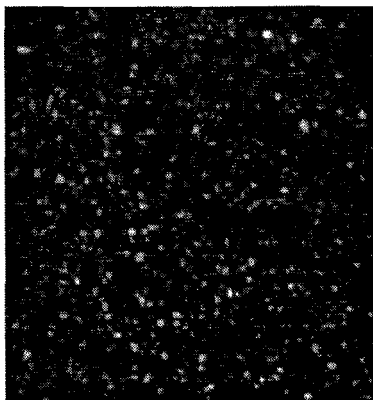
heden omdat het nauwelijks gevoelig is voor externe invloeden. De toepasbaarheid van shearografie wordt versterkt door het te combineren met de fasestaptechniek. Onder gelijke omstandigheden hebben fasegestapte interferometers een hogere gevoeligheid dan systemen zonder fasestaptechniek. Met fasegestapte interferometrie wordt de faseverdeling berekend met behulp van meerdere interferentiepatronen, waarbij de fase van de referentiebundel tussen de opnames met een bepaalde waarde wordt veranderd. Door de fasegestapte interferogrammen gelijktijdig op te nemen en te verwerken, kan een real time systeem verkregen worden. Hiervoor zijn meerdere kanalen in de interferometer nodig.



Figuur 2  
Interferometer in werktoestand

Ons systeem is een meerkanaalssysteem en is gebaseerd op het simultaan opnemen van vier fasegestapte interferentiepatronen met behulp van twee CCD camera's. Uit de vier gemeten interferogrammen wordt door een speciaal beeldbewerkingssysteem een faseverdeling van het te inspecteren object berekend. De belangrijkste eigenschappen van onze shearing spikkelinterferometer zijn de snelheid van meten en de gereduceerde gevoeligheid voor externe invloeden. Door de simultane opname van de fasebeelden en de real time beeldbewerkings-

apparatuur is een systeem verkregen dat de faseverandering met videosnelheid, d.w.z. 25 keer per seconde, bepaalt. De ontwikkelde interferometer is compact opgebouwd en gebruikt een diode laser als bron.



Figuur 3  
Spikkelpatroon

### Spikkelinterferometrie

Als een ruw oppervlak wordt belicht met coherent licht, ontstaat er een spikkelpatroon als resultaat van interferentie tussen vele coherente bijdragen van de diffuus gereflecteerde bundel. Veel overlappende lichtbijdragen interfereren in een

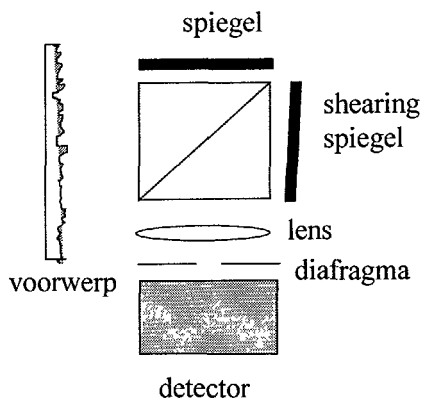
enkel detectiepunt. De fase van het licht in een beeldpunt wordt bepaald door de positie van een klein gebied op het oppervlak. Als dit gebied beweegt, varieert de fase in het corresponderende beeldpunt. Dit fenomeen wordt vaak gebruikt voor het nauwkeurig bepalen van verplaatsingen.

### Shearing interferometrie

Twee bundels zijn benodigd om een interferentiepatroon te genereren op het detectievlak van een interferometer: een objectbundel en een referentiebundel. In conventionele interferometrie wordt de referentiebundel ergens in de interferometer gegenereerd door middel van een referentie-oppervlak. Daarom is toepassing van dit soort systemen in een industriële omgeving vaak problematisch, omdat het extreem gevoelig is voor variaties in de omgevingsconditie, zoals bijvoorbeeld luchtstroming of trillingen. In shearografie echter, worden twee lateraal verschoven ('geshearde') beelden van het object gegenereerd in het detectievlak door middel van een optisch element (bijvoorbeeld door een gekantelde spiegel, zoals is weergegeven in Figuur 1). In de overlappende gebieden van de twee beelden ontstaat interferentie. Op deze manier is de behoefte aan een aparte referentiebundel weggenomen.

Als deze interferentiepatronen worden opgenomen voor en na een vervorming van het voorwerp, levert de relatieve verplaatsing tussen de interfererende objectpunten een interferentiepatroon dat bij benadering de hellingsverandering van het oppervlak in de richting van de shear beschrijft. De gevoeligheid van een shearografiesysteem kan gevarieerd worden door de shearafstand te variëren.

Een bijkomend voordeel van shearografie betreft de eisen voor de coherentielengte van de laser. Voor een optimale modulatie diepte, en daarmee optimale meetnauwkeurigheid, van het interferentiepatroon, moet het optische padlengteverschil tussen de object- en referentiebundel ruim binnen de coherentie lengte van de laser



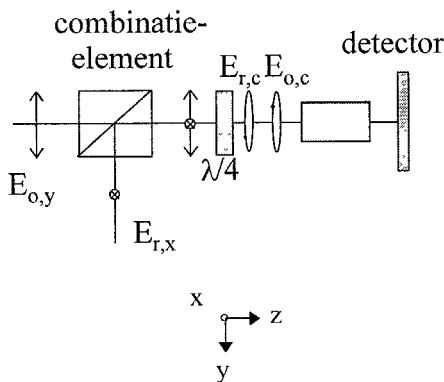
Figuur 4  
Shearing interferometrie

liggen. Vergeleken met een conventionele interferometer met een vlakke referentiebundel zijn de eisen voor de coherentielengte van de lichtbron drastisch verminderd voor shearingsystemen, omdat interfererende bundels via nabijgelegen paden lopen. Dit maakt het gebruik van een halfgeleiderlaser mogelijk, hetgeen de transporteerbaarheid van het complete systeem enorm verhoogt.

### Fasestaptechniek

Zoals eerder gezegd, wordt de toepasbaarheid van shearing interferometrie voor deformatiemetingen verder vergroot door gebruik van de fasestaptechniek. Fasegestapte interferometers berekenen de faseverdeling van een interferogram dat vervolgens op een video monitor wordt getoond. Dit "faseplaatje" wordt berekend uit ten minste drie verschillende interferentiepatronen, elk met een ander faseverschil tussen de twee interfererende bundels. De fase van de referentiebundel wordt veranderd bij elke opname met een vaste waarde, vaak  $\pi/2$  of  $2\pi/3$  radialen. Zodoende wordt er een set van fasegestapte interferentiepatronen gegenereerd, waaruit de faseverdeling berekend kan worden. De fasestaptechniek kan op vele wijzen uitgevoerd worden, waarbij een indeling gemaakt kan worden in twee hoofgroepen: tijdsgebonden technieken en ruimtegebonden technieken. Bij deze eerste categorie worden de fasegestapte beelden achtereenvolgens geproduceerd en opgenomen. In het algemeen betekent dit dat één detector de verschillende opnames achtereenvolgens maakt en dat deze opgeslagen moeten worden voordat ze worden bewerkt. Daarom vereist deze techniek dat het testvoorwerp en de omgevingsparameters gedurende de opname van de (minstens) drie beelden stabiel is. Bij ruimtegebonden fasestaptechnieken worden de verschillende fasegestapte beelden tegelijkertijd gegenereerd. Ze worden simultaan opgenomen, vaak door middel van verscheidene camera's, en de faseberekening kan real time gebeuren. Dit maakt de

ze systemen snel en reduceert de gevoeligheid ervan voor externe variaties nog meer. Een bijkomend voordeel is dat de beelden ook real time gefilterd kunnen worden, omdat het ruwe fasebeeld direct beschikbaar is. Om de drie of meer patronen gelijktijdig op te nemen zijn een gelijk aantal kanalen in de interferometer nodig.



Figuur 5  
Polarisatie fasestappen

### Polarisatiefasestaptechniek

Er zijn diverse technieken om de fase van een referentiebundel te veranderen, bijvoorbeeld door één van de spiegels in de shearingkop te verplaatsen in de richting van de invallende bundel of door de polarisatie-eigenschappen van het licht te gebruiken. Deze laatste techniek kan gebruikt worden voor het simultaan genereren van fasegestapte interferentiepatronen. Het principe van polarisatiefasestappen is in Fig 5 weergegeven. De object- en referentiebundel zijn lineair gepolariseerd met de polarisatierichtingen onderling loodrecht. Deze polarisatietoestanden zijn in Fig. 5 weergegeven door de veldcomponenten  $E_{o,y}$  en  $E_{r,x}$ . Deze twee bundels worden gecombineerd tot een enkele bundel en deze plant zich voort door een kwart lambda vertragsplaatje heen, waarvan de snelle as een hoek van 45 graden maakt met de beide invallende polarisatierichtingen. Dit resulteert in de transformatie van

de twee lineaire toestanden in twee circulaire toestanden, beschreven door  $E_{r,c}$  en  $E_{o,c}$ , die een tegengestelde rotatierichting hebben. Deze vallen in op een analysator, die één component van de polarisatierichting eruit haalt. De oriëntatie van de analysator met betrekking tot die invallende polarisatierichting bepaalt de waarde van de fasestap.

Om verschillende fasegestapte interferentiepatronen met een verschillende fasestap tussen de interfererende bundels op te nemen, wordt de amplitude van de interfererende bundels gesplitst in verschillende bundels voordat ze de analysator intreden. Op deze wijze worden de verschillende kanalen in de interferometer gegenereerd, wordt in elk kanaal de fasestap ingesteld en wordt het resulterende interferentiepatroon opgenomen op een CCD camera. Een nadeel van het simultaan opnemen van de verschillende interferogrammen met verschillende camera's is de vereiste uitlijnnauwkeurigheid van de beelden op de betreffende camera's. Omdat corresponderende beeldelementen van elke camera informatie opnemen van hetzelfde objectpunt, moeten de beelden uitgelijnd

worden met een nauwkeurigheid groter dan de grootte van een beeldelement, die gemiddeld ongeveer 10 micrometer bedraagt. Een kleine uitlijnfout kan de meetnauwkeurigheid van het systeem aanzienlijk verlagen. Vooral wanneer een real time fasegestapte interferometer onder industriële omstandigheden moet werken, moet speciale aandacht geschonken worden aan de uitlijnstabiliteit. Om dit probleem te reduceren, hebben wij ervoor gekozen om twee CCD camera's te gebruiken om vier interferentiepatronen op te nemen: twee interferogrammen vallen naast elkaar op het detectievlak van elke camera. Hierdoor ontstaat er een compacter en stabiel systeem.

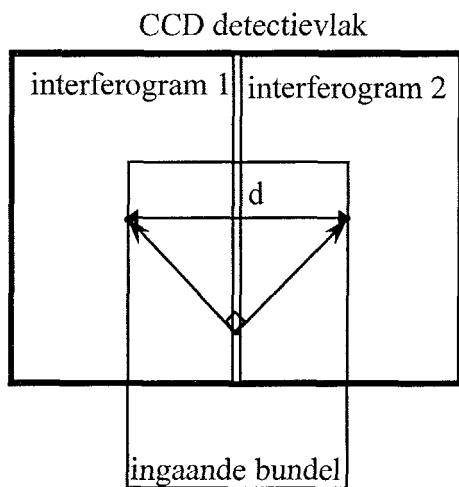
Voor het opsplitsen van de inkomende set van bundels in twee aparte bundels worden speciale bundelverplaatsers gebruikt, zogenaamde Savart elementen. Deze Savart elementen bestaan uit twee segmenten (uniaxiaal) dubbelbrekend materiaal, in ons geval calciet. De twee segmenten zijn zo georiënteerd dat hun optische assen onderling loodrecht staan. Een inkomende bundel met willekeurige polarisatierichting wordt gesplitst in twee onderling verschoven bundels met onderling loodrechte polarisatierichtingen. De lengtes van de segmenten bepalen de verplaatsing. De twee ruimtelijk gescheiden interferentiepatronen worden vervolgens naast elkaar opgenomen door één camera, zoals in Fig. 6 te zien is.

Door het plaatsen van verfringsplaatjes voor de Savart elementen, kunnen de interferogrammen een correcte fasestap krijgen. Dus door middel van twee zulke camera's, kunnen vier interferogrammen geïmplementeerd worden.

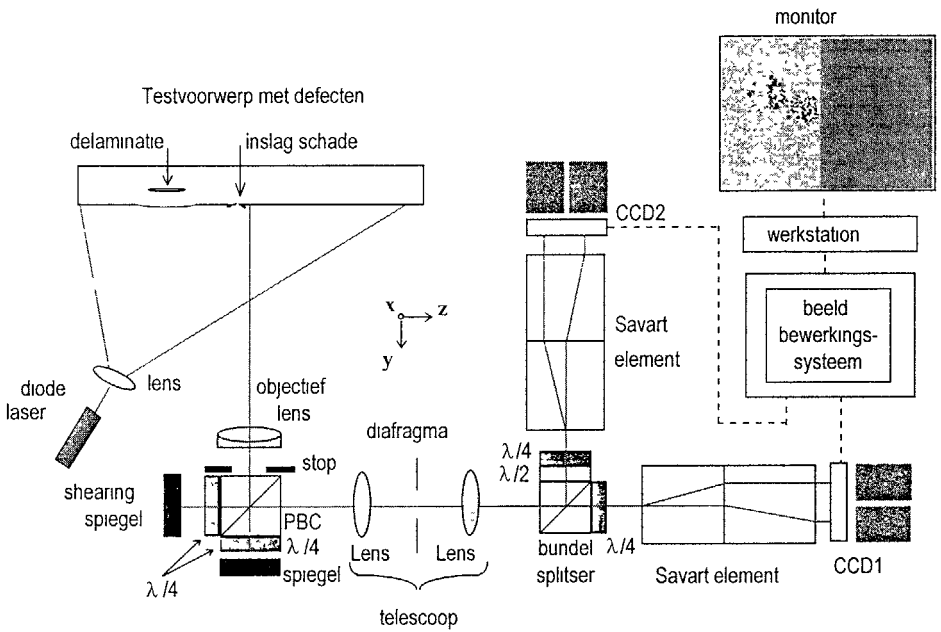
### Systeembeschrijving

In Fig. 7 is een overzicht van onze opstelling gegeven.

Het coherente, divergerende licht van een halfgeleider laser (984 nm, 1 Watt) verlicht het voorwerp. Het licht wordt diffuus verstrooid door het ruwe oppervlak van het ob-



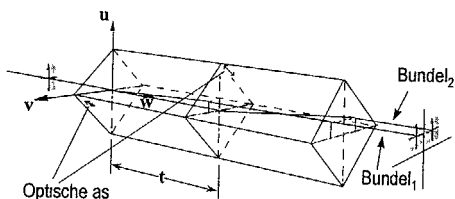
Figuur 6  
Beelden in het detectievlak



Figuur 7  
De real time fasegestapte shearing spikkelinterferometer

ject en een deel ervan wordt ingevangen door de interferometer. Het oppervlak wordt afgebeeld op de camera's door een afbeeldend systeem, bestaande uit een objectief en een telescopisch lenzenstelsel. Het telescopisch lenzenstelsel is nodig om het beeldvlak van het objectief naar de camera's te verleggen. Het beeldvlak van het objectief is namelijk slechts 10 mm achter de lens gepositioneerd, terwijl een ruimte van 200 mm nodig is om alle elementen van de interferometer te positioneren. Midden tussen de telescooplens is een diafragma geplaatst waarmee de spikkelgrootte ingesteld kan worden. Via een polariserende bundelsplitser (PBC) wordt het licht in tweeën gesplitst en propageert door een kwart lambda plaatje heen naar twee spiegels. Eén van de spiegels kan geroteerd worden, waardoor de shear in grootte en richting aangepast kan worden. Deze combinatie van kwart lambda plaatjes en PBC stelt ons in staat om nage-

noeg 100% van het licht te gebruiken dat ingevangen wordt door het objectief, in tegenstelling tot normale Michelson interferometers, waar de helft van het licht verloren gaat. Tegelijkertijd wordt de polarisatietoestand van zowel object- als referentiebundel bepaald in overeenstemming met de eisen voor de fase-stapptechniek. Het licht dat op de tweede bundelsplitser (BSC) – nu een nietpolariserende – invalt bevat twee lineaire, onderling orthogonaal gepolariseerde bijdragen: de object- en de referentiebundel. Vervolgens gaat de doorgaande bundel door een kwart lambda plaatje heen, die de bundels in circulair gepolariseerde bundels met tegengestelde draairichting transformeert. Vervolgens vallen beide bundels op de Savart elementen, die zowel functioneren als analysatoren als bundelverplaatsters. Vergeleken met een normale analysator, die een enkele as heeft, hebben we nu een analysator met twee onderling loodrechte



Figuur 8  
Savart element

assen, die elk een hoek van 45 graden met de x-as maken. Hierdoor worden twee interferentiepatronen gegenereerd met fase-stap waarden van 0 en  $\pi$  op CCD1. In het kanaal van CCD2, is een extra half lambda plaatje geïmplementeerd, met zijn optische as onder een hoek van 22.5 graden t.o.v. de x-as, waardoor er een extra fase-stap van  $\pi/2$  aangebracht wordt tussen de interferentiepatronen op CCD2 ten opzichte van de overeenkomstige patronen op CCD1. Dus, vier fasegestapte interferogrammen zijn gegenereerd en worden gelijktijdig opgenomen op de twee camera's. De interferogrammen op de CCD camera's kunnen beschreven worden met behulp van:

$$I_r(x,y) = I_o(x,y) + I_r(x,y) + 2 \sqrt{I_o(x,y) I_r(x,y)} \cos \left( \varphi(x,y) + (n-1) \frac{\pi}{2} \right) \quad (1)$$

$$(n = 1, 4)$$

waarbij  $I_o(x,y)$  de intensiteitsverdeling van de objectbundel beschrijft,  $I_r(x,y)$  die van de referentiebundel en  $\varphi(x,y)$  de te bepalen faseverdeling. Deze faseverdeling kan berekend worden (modulo  $2\pi$ ) in elke detectiepunten met behulp van:

$$\varphi(x,y) = \arctan \left( \frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - I_3(x,y)} \right) \quad (2)$$

De CCD camera's zijn verbonden met een real time beeldbewerkingssysteem dat de faseverdeling berekent met videosnelheid (d.w.z. 25 beelden per seconde).

## Het beeldbewerkingssysteem

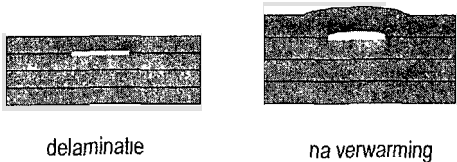
Van de opgenomen interferentiepatronen wordt de fase berekend met behulp van vergelijking 2 door de noemer en de teller van deze vergelijking te bepalen en een tweedimensionale tabel te gebruiken, waarin de arctangens functie besloten ligt. Deze tabel geeft de fase modulo  $2\pi$ . Het gebruik van een dergelijke tabel in plaats van de echte arctangens berekening versnelt het rekenproces.

Om deformaties te kunnen meten worden de fasebeelden van twee verschillende toestanden van het object van elkaar afgetrokken. Het resulterende faseverschilbeeld representeert de faseverandering tussen de twee toestanden en wordt direct op een videomonitor getoond. De gemeten faseverdeling bevat ruis, die gefilterd kan worden door een speciale filtertechniek, waarbij in elk punt van het detectoroppervlak de cosinus en de sinus van de fase gefilterd worden in plaats van de fase zelf, waardoor filtering van fase-discontinuïteiten voorkomen wordt. Dit proces reduceert de ruis aanzienlijk.

## Toepassing: inspectie van een stuk heli-copter

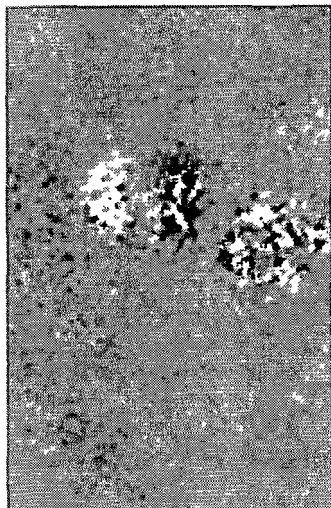
Defect detectie door middel van interferometrische technieken is mogelijk door de oppervlaktevervorming van een voorwerp te bepalen voor en na het aanslaan van het object te observeren. Hierdoor kunnen defecten gedetecteerd worden doordat het oppervlak boven deze defecten zich lokaal anders zullen gedragen dan stukken zonder defecten.

Defecten zullen zo dus zichtbaar zijn als inhomogeniteiten in de gemeten faseverschilverdeling over het objectoppervlak voor en na het aanslaan.



Figuur 9  
Principe van defect detectie

Als voorbeeld laten we hier het resultaat zien van een inspectie van een stuk romp van een helicopter. In het inspectiegebied bevindt zich een inslagshade en een onderhuidse delaminatie.

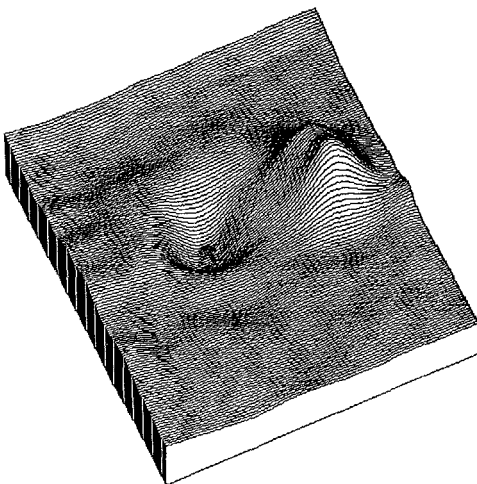


Figuur 10  
Gemeten faseverandering

Dit plaatje toont het faseverschilbeeld tussen twee beelden opgenomen tijdens het afkoelen van het voorwerp (5 seconden verschil). Het voorwerp is hiervoor verwarmd met hete lucht. We zien duidelijk twee onregelmatigheden en aan de rechterkant de inslagshade. Door dit beeld te filteren, kunnen de defecten nog duidelijker gemaakt worden, zoals Fig 11 (a) en (b) laten zien.



(a)



(b)

Figuur 11  
Gefilterde delaminatie in (a) grijswaardenrepresentatie en (b) als oppervlakteweergave

Aan deze beelden is tevens goed te zien dat de hellingsverandering gemeten wordt met shearografie.



## **Samenvatting**

De beschreven real time fasegestapte shearing spikkelinterferometer kan vervormingen meten van diffuus reflecterende voorwerpen met videosnelheid. Twee CCD camera's worden gebruikt om vier fasegestapte interferogrammen op te nemen. Vanwege de korte opnametijd en de gebruikte shearingtechniek is ons systeem geschikt om in industriële omstandigheden te functioneren. Daarnaast zou het systeem gebruikt kunnen worden om snelle en voorbijgaande fenomenen, zoals bijvoorbeeld trillingen of schokgolven, te meten.

## **Dankwoord**

Dit onderzoek is uitgevoerd met financiële ondersteuning in de vorm van twee Europese projecten: BRITE-EURAM 5879, onder contract nummer BRE-CT92-0313 en EUCLID RTP3.1, en in nauwe samenwerking met TNO/TPD.