

Holografische Interferometrie voor Niet-destructief Onderzoek

ir. J.W. Burgmeijer

Technisch Fysische Dienst TNO-TH, Stieltjesweg 1, Delft.

Inleiding

In dit artikel wordt de toepassing van de holografische interferometrie in het niet-destructieve onderzoek besproken. Een meer uitgebreide beschrijving vindt men in de tekstboeken 1, 2 en 3. Een resumé van de algemene theorie zal worden gegeven. Daarna worden enkele veel voorkomende problemen gegeven die men tegen-

komt wanneer men holografische interferometrie in zeer uiteenlopende toepassingen wil gebruiken. Twee voorbeelden van holografische testmethoden, die bij de TPD in ontwikkeling zijn, zullen gegeven worden. Het eerste voorbeeld betreft een testmethode voor verfsystemen waarmee de aanwezigheid van kleine defecten

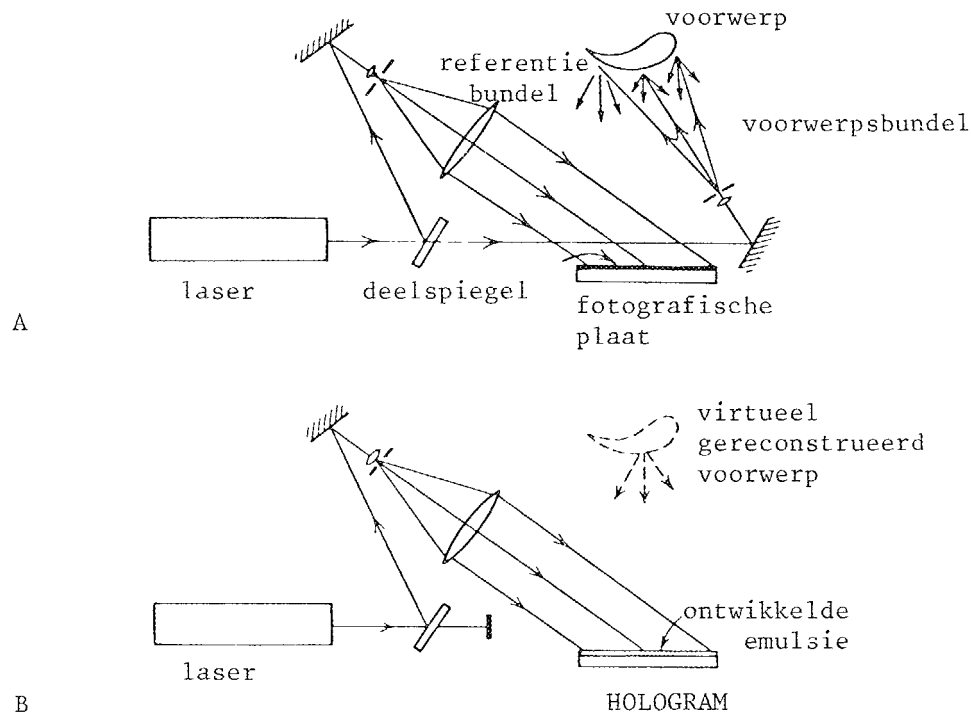


fig. 1

Opname (a) en reconstructie (b) van een hologram in de standaard holografische techniek

(blaren en onthechtingen) vroegtijdig aangetoond kan worden.

Het tweede voorbeeld betreft een inspectiemethode naar vermoeïngsscheurgroei vanuit gevulde boutgaten. Deze methode kan toegepast worden bij de inspectie van vliegtuigvleugels

1. Resumé van de algemene theorie

Bij de opname van een hologram (figuur 1a) zullen 2 lichtbundels, afkomstig van dezelfde laser, interfereren op een fotografische plaat (het hologram) Dit zijn:

1. De voorwerpsbundel door het voorwerp diffuus verstrooid laserlicht
2. De referentiebundel. Via spiegels en lenzen gericht laserlicht, invallend onder een hoek op de fotografische plaat.

Dit primaire interpretatiepatroon is zeer complex en bevat de informatie over het belichte drie-dimensionale oppervlak van het voorwerp. Men kan dit patroon registreren mits men fotografisch materiaal gebruikt met een hoog ruimtelijk scheidend vermogen (tot ca. 3000 Lp/mm). De fotografische registratie wordt "hologram" (Grieks, holos = geheel) genoemd, omdat men bij belichting hiervan met de referentiebundel, het opgenomen voorwerp volledig, in drie dimensies kan reconstrueren (figuur 1b). Als men door het hologram kijkt is het virtuele beeld van het voorwerp zichtbaar. Fascinerende voorbeelden van hologrammen zijn permanent geexposeerd in het Technisch Tentoonstellings Centrum (TTC) in Delft.

Men kan ook meerdere hologrammen op één fotografische plaat vastleggen. In de holografische interferometrie maakt men aldus gebruik van de geheugen eigenschappen van het hologram. Als men de standaard methode van de dubbele belichting toepast, legt men op één fotografische plaat twee toestanden vast van eenzelfde voorwerp, opgenomen op verschillende tijdstippen. Verschillen tussen de twee toestanden worden, mits deze verschillen niet te groot zijn, zichtbaar in de vorm van een secundair interferentiepatroon over het voorwerp. De registratie van dit patroon noemen we "interferogram".

De donkere en lichte lijnen in het interferogram verbinden verschillende punten op het voorwerp die een gelijke vervorming hebben ondergaan tussen de twee belichtingstijden in. Het verschil in vervorming van punten op 2 opeenvolgende lichte (of donkere) lijnen, is van de orde-grootte van een halve golflengte van het gebruikte laserlicht, d.i. ongeveer 0,3 μm . De richting van de vervorming wordt bepaald door de geometrie van de holografische opstelling, maar is in de meeste gevallen vrijwel loodrecht op het oppervlak van het voorwerp. Kwantitatieve gegevens over de vervormingen in een groot aantal punten van het voorwerp kan men verkrijgen bij nauwkeurige kennis van de geometrie van de opstelling. In vele gevallen is het voldoende de vervormingen kwalitatief af te leiden uit de interferogrammen. Duidelijke afwijkingen van het vervormingspatroon op bepaalde plaatsen op het voorwerp duiden op de aanwezigheid van defecten op of onder het oppervlak van het voorwerp. De holografische interferometrie is daarom zeer geschikt voor het aantonen en het localiseren van kleine defecten in materialen en constructies. We zullen nu nader ingaan op de toepassing in het niet-destructieve onderzoek.

2. Toepassing in praktijksituaties

Er zijn een aantal algemene problemen die op kunnen treden als we de holografische interferometrie toepassen in een praktijkomgeving. De oplossingen hiervoor zijn sterk afhankelijk van de mogelijkheden in de specifieke praktijksituatie

1. *Trillingen* tijdens de belichting van het hologram, met amplitude in de orde van μm 's, en aanwezig tussen het voorwerp en de hologramplaat, kunnen het contrast van het primaire interferentiepatroon sterk doen afnemen. Hierdoor neemt de zichtbaarheid van het voorwerp bij reconstructie sterk af. Er zijn globaal 2 oplossingen voor dit probleem mogelijk.

- a) In een optisch laboratorium kan men door gebruik van speciale trillings-

geïsoleerde tafels, belichtingstijden toestaan van meer dan een minuut. Hierdoor kan men continue lasers (Argon, He-Ne, of Krypton) toepassen voor de belichting.

b. Door gebruik van hoogvermogen pulslasers met zeer korte belichtingsduur kan men vrijwel in elke situatie buiten het laboratorium holografieren. Veel toegepast zijn de robijnlasers met een pulsduur van 25 ns en een pulsenergie van minimaal 30 mJoule en maximaal enkele Joules. Afhankelijk van de pulsenergie kunnen kleine tot grotere voorwerpen (enkele m^2) geholografeerd worden

2. *Bewegingen* van het voorwerp ten opzichte van het hologram tussen de twee belichtingstijden en in de orde van enkele μm 's of meer zullen een ontoelaatbaar aantal extra interferentielijnen in het interferogram geven. Het gaat hier meestal om translaties en rotaties van het voorwerp. Bij gebruik van trillingsgeïsoleerde tafels treden deze bewegingen meestal niet op, of kan men tijdens de reconstructie van het hologram door het verstellen van een spiegel dit compenseren ("fringe control" technieken)

Bij gebruik van een pulslaser kan men 2 lichtflitsen direct na elkaar afvuren, met een interval tussen 1 μs en 1 ms. De verplaatsingen tussen de 2 belichtingstijdstippen zijn dan in het algemeen gering, zodat slechts een klein aantal extra interferentielijnen in het interferogram optreden. Door gebruik van een dynamische belastingmethode moeten de gewenste vervormingen binnen dit interval gerealiseerd kunnen worden. Veel toegepast hierbij is het in resonantie laten trillen van het voorwerp

3. De fotografische platen zijn lichtgevoelig en een surplus van *omgevingslicht* boven laserlicht zal het contrast van het primaire interferentiepatroon sterk verzwakken, zodat de zichtbaarheid van het voorwerp bij reconstructie

sterk afneemt in een laboratoriumomgeving kan men de opstelling plaatsen in een goed te verduisteren ruimte. Buiten het laboratorium moet men echter rekening houden met daglicht. Bij gebruik van een pulslaser kan men de fotografische plaat in een houder met mechanische sluiters plaatsen, waarbij men het afvuren van de laserpuls moet synchroniseren met het openen van de sluiters.

4. Een economische voorwaarde voor de bruikbaarheid van een niet-destructieve testmethode is dat ze *eenvoudig* is en uitvoerbaar in de praktijkomgeving door niet gespecialiseerd technisch personeel. Een belangrijke vooruitgang hierbij is de toepassing van foto-thermo-plastisch materiaal voor de opname van de hologrammen. Door een fysisch procedé kan men de hologrammen instantaan binnen ongeveer 10 seconden ontwikkelen en fixeren

Een sterke vereenvoudiging van de holografische opstelling is eveneens mogelijk door toepassing van Denisjuk reflectie-holografie. Hierover in ons tweede voorbeeld meer.

Een algemeen probleem bij de toepassing in het niet-destructief testen is dat men een geschikte *belastingmethode* moet vinden waarmee men het gewenste vervormingspatroon tussen de 2 belichtingstijden in kan realiseren. Dit gewenste patroon zal een visueel zichtbare afwijking moeten geven op de plaats waar een defect op het voorwerp aanwezig is. De gekozen belastingmethode beperkt in sterke mate de toepasbare holografische interferometrische technieken. Voor een groot aantal toepassingen zijn dan ook een groot aantal holografische technieken ontwikkeld. We zullen nu 2 toepassingen bespreken die recent bij de Technisch Fysische Dienst in ontwikkeling zijn.

3. Voorbeeld: Het holografisch testen van verfsystemen

In het onderzoek naar nieuwe industriële

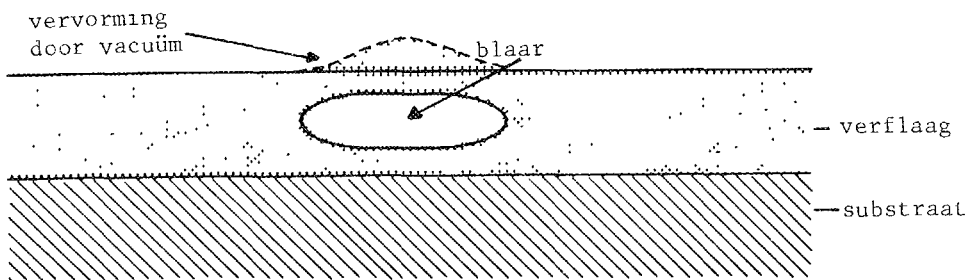


fig. 2

Principe van de belastingmethode voor het holografisch testen van verfsystemen Een blaar onder hygroscopische druk veroorzaakt een vervorming van het verfoppervlak (stippellijn) na verlaging van de buitendruk

verfsystemen, is men geïnteresseerd in de detectie van kleine defecten in verfsystemen zoals: blaren, onthechtingen en vacuolen. Deze defecten kunnen ontstaan door een slechte applicatiemethode, door corrosie van het substraat of door diverse andere invloeden. Bij de beproeving van deze nieuwe verfsystemen wil men de defecten zo vroeg mogelijk kunnen detecteren. Dit kan van belang zijn voor zowel bedrijven die verf fabriceren als bedrijven die verf op grote schaal toepassen. In het algemeen zal de beproeving van de nieuwe verfsoort in een laboratoriumomgeving plaats vinden. De huidige, meest toegepaste methode is visuele inspectie na een snelverwerkingsproces. Dit proces zou men wellicht kunnen verkorten door gebruik van een gevoeliger detectiemethode dan de visuele inspectie

In figuur 2 is het principe van de door ons toegepaste methode gegeven. Een blaar onder hygroscopische druk is aanwezig in de verflaag. Als we de druk buiten het verfsysteem verlagen zal de verflaag boven de blaar vervormen (aangegeven met een stippellijn). Elastische vervormingen treden hierbij direct op, maar zijn in veel gevallen te gering. Visco-elastische vervormingen ontwikkelen zich in de tijd, en zijn vaak voldoende groot voor detectie met holografische interferometrie. Wij gebruiken de standaard holografische techniek (figuur 1)

waarbij met een He-Ne-laser en een thermoplastencamera op een trillingsgeïsoleerde tafel gewerkt wordt. Het verfsysteem wordt op een substraat aangebracht waarop na drogen en eventueel een kort verwerkingsproces een vacuümlok (diameter 75 mm) bevestigd wordt. De eerste holografische opname wordt gemaakt met een atmosferische luchtdruk (of iets verlaagd) op het verfsysteem. Daarna wordt het hologram instantaan ontwikkeld en direct gereconstrueerd. Door gelijktijdige observatie van het gereconstrueerde (onvervormde) voorwerp en het voorwerp in ware tijd, worden alle vervormingen direct zichtbaar. Wordt nu de luchtdruk verlaagd tot bijvoorbeeld 0,01 atm, dan wordt allereerst de vervorming van het substraat zichtbaar (circular interferentiepatroon). Na enkele minuten tot enkele uren worden ook de viscoelastische vervormingen bij de blaren en de andere defecten zichtbaar. In figuur 3 zijn enkele voorbeelden gegeven van interferogrammen van een verfsysteem van Alkyd-Satin op een Washprimer. Defecten als blaren en onthechtingen zijn binnen 24 uur zichtbaar voor verflagen dunner dan 180 μm , en defectdiameter tussen 0,1 en enkele mm's (4)

4. Voorbeeld: Holografische inspectie van vermoeiingsscheurgroei.

Bij de regelmatige inspectie van de vleugel-

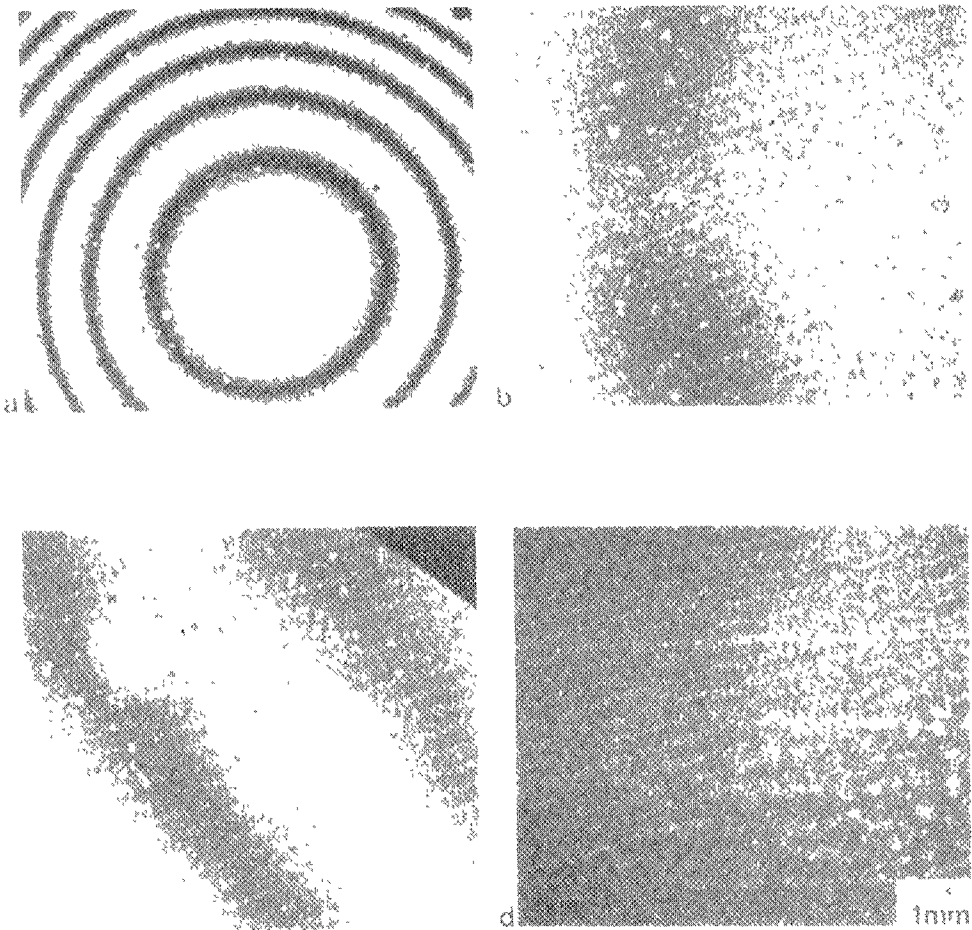


fig. 3

Enkele interferogrammen van verfsystemen van Alkyd-Satin op een Washprimer

- a Een $30\ \mu\text{m}$ dikke verflaag direct na intrede van het vacuum met een aantal blaren zichtbaar.
- b Een $65\ \mu\text{m}$ dikke verflaag na 4 uur vacuum, met een hoge dichtheid van blaren
- c. Een $160\ \mu\text{m}$ dikke verflaag na 20 uur vacuum, met blaren en een kleine onthechting (links boven)
- d Een $70\ \mu\text{m}$ dikke verflaag na 2 uur vacuum, met aan de onderkant blaren als gevolg van corrosie van het substraat

huid van een vliegtuig wil men vermoeiings-scheuren in bouten tijdig detecteren. Terwijl de bout geïnstalleerd moet blijven en ook de vleugel niet gedemonteerd kan worden, wil men scheuren met een lengte van enkele mm's detecteren die de oppervlakte van de huid nog niet bereiken hebben. In dit voorbeeld komen de eerder genoemde problemen van trillingen, bewegingen, omgevingslicht en eenvoud naar voren. Als oplossing wordt een techniek toegepast, gebaseerd op Denisjuk reflectie-holografie. Hierbij wordt de plaathouder met mechanische sluiters magnetisch vastgeklemd boven de te inspecteren bout. Bewegingen tussen holografische plaat en voorwerp zijn dan in sterke mate gecompenseerd.

Tussen de 2 opnamen van het hologram wordt de mechanische trekkracht op de vleugel huid vergroot of verkleind. Dit realiseert men in de praktijk door het opkrikken van de romp van het vliegtuig.

Voor de volledige eliminatie van de invloed van trillingen en van omgevingslicht past

men een pulslaser toe. De twee laserpulsen (25 ns, 30mJ) hebben een erg lang pulsinterval, nodig voor het opkrikken van de vliegtuigromp. De hier gekozen effectieve bewegingscompensatie is dan ook van groot belang.

De opstelling blijft daarentegen eenvoudig, zoals blijkt uit figuur 4. De hologrammen moeten gereconstrueerd worden in reflectie en bij voorkeur met een He-Ne laser. De platen bevatten zilver-halogenide emulsies (Agfa-Gevaert 8E75 HD) die met een eenvoudig omkeer bleek procedé verwerkt worden (5)

Enkele resultaten van experimenten met een representatief proefstuk onderworpen aan een representatieve vermoeiingscyclus, zijn gegeven in figuur 5. De experimenten zijn uitgevoerd bij het Nationaal Lucht en Ruimtevaartlaboratorium in de Noord-Oostpolder, waar men voor het maken van de hologrammen eveneens de genoemde problemen met trillingen, bewegingen en daglicht had. De hologrammen werden

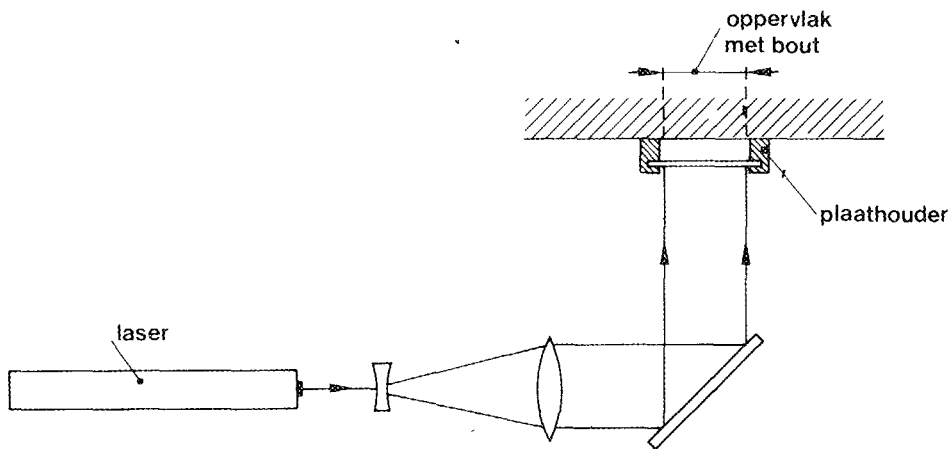


fig. 4

Principe van de holografische opstelling voor de inspectie van vermoeiingsscheurgroei.

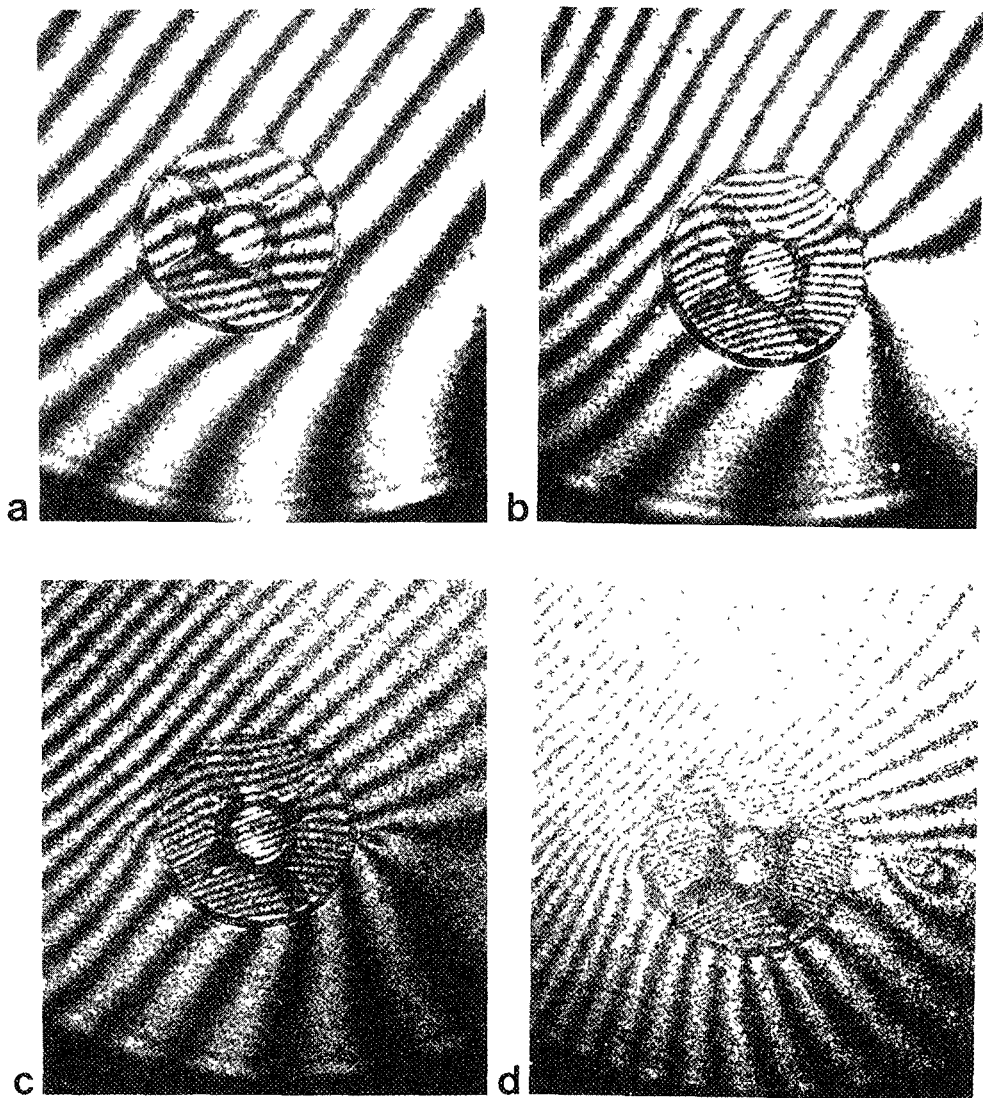
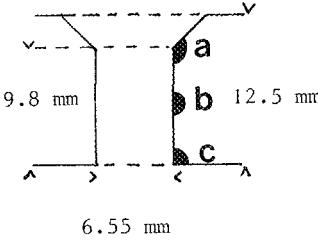


fig. 5
 Enkele interferogrammen van stadia van vermoeiingsscheurgroei
 In interferogram a is de huid nog gaaf In b, c en d ziet men rechts en links van de kop van de bout
 steeds sterkere afwijkingen die duiden op een toenemende lengte van de scheur

dwarsdoorsnede bout met posities van scheurinitiatie	scheurinitiatie	detecteerbare scheurlengte
	<p>a. bout verzinking</p> <p>b. midden boutgat</p> <p>c. onderin boutgat</p>	<p>3,5 mm</p> <p>4,0 mm</p> <p>4,5 mm</p>

tabel 1 Scheurdetectiegrenzen bij een vermoeingsproef.

telkens na een bepaald aantal vermoeingscycli genomen. De trekkracht bij het eerste en tweede belichtingstijdstip kan betrekkelijk eenvoudig met dezelfde vermoeingsmachine worden uitgeoefend. Deze trekkracht was, omgerekend voor dit proefstuk, gelijk aan de trekkracht voor en na het opkrikken van de romp van het vliegtuig.

Voortgezette experimenten in 1983 hebben nu voor een aantal gevallen van scheurinitiatie het verband geleverd tussen de vorm van het scheurfront op het breukvlak en het interferogram dat op dat moment gemaakt was. De scheurdetectiegrenzen kunnen daardoor globaal worden vastgesteld. Dit is weergegeven in tabel 1. Hieruit blijkt dat indien de scheuren dieper in het boutgat geïnitieerd zijn, de detec-

teerbare scheurlengte ook groter is. Voor deze toepassing zullen ultrasonische methoden, en in mindere mate wervelstroom methoden, gevoeliger scheuren kunnen detecteren onafhankelijk van de positie van scheurinitiatie in het boutgat. Met holografie kan de positie van de scheur langs de rand van het boutgat echter wel nauwkeurig vastgesteld worden.

5. Toekomstige ontwikkelingen

Voor een toekomstig gebruik van holografische interferometrie in het niet-destructief onderzoek zal, afhankelijk van de specifieke toepassing, een verdere ontwikkeling vanuit bestaande technieken veelal noodzakelijk zijn. Deze ontwikkeling kan liggen op het gebied van de holografische techniek, van een geschikte belasting-

techniek of van kwantitatieve technieken voor beeldanalyse. Gezien de reeds bestaande mogelijkheden en de groeiende interesse voor het niet-destructief onderzoek verwachten wij verdere ontwikkelingen op verschillende gebieden zoals vliegtuigcon-

structies, constructies in de werktuigbouw en civiele techniek, tandheelkundige en orthopedische technieken. Ervaring en apparatuur hiervoor is beschikbaar bij de Technisch Fysische Dienst in Delft.

Literatuur

1. Erf (ed), Holographic non-destructive testing. Academic Press, New York (1974)
2. C Vest, Holographic interferometry. John Wiley, New York (1979).
3. N. Abramson, The making and evaluation of holograms Academic Press, London (1981).
4. J.W. Burgmeijer, P.C. Hopman, Holographic testing of vacuum stressed paint films Conference proc. Dubrovnik 1982. Spie-paer 370-25
5. R L van Renesse and J.W. Burgmeijer, The application of Denisyuk pulsed holography to material testing. Conference proc. Geneva 1983. Spie-paper 398-18.