

O10

HOLOGRAFI (FÖRKORTAD VERSION)

MÅLSÄTTNING.

Laborationen vill visa hur man framställer ett hologram och vilka fysikaliska egenskaper detta har.

FÖRBEREDELSE.

Du skall ha läst detta lab.- PM och motsvarande avsnitt i din lärobok. Du skall kunna svara på instuderingsfrågorna längst bak i detta lab.- PM.

Namn..... Kurs.....
Handledare..... Utförd den.....
Godkänd den..... av.....

Inledning

Nobelpriset i fysik 1971 gick till den vid Stanford, USA, verksamme engelske fysikern Dennis Gabor för hans uppfinning och vidareutveckling av holografi, en metod för tredimensionell avbildning. Hans första teoretiska arbete kom 1948 och hans avsikt var att förbättra bildkvalité och upplösning hos elektronmikroskop.

En praktisk definition av holografi skulle kunna sägas vara: upptagning av en bild eller ett föremål med utnyttjande av alla egenskaper hos det ljus som reflekteras eller släpps igenom av föremålet. De grekiska orden "holos" och "graphoo", från vilka ordet holografi bildats, betyder "hel" och "skriva".

Med "ljusets alla egenskaper" menas:

- a) Intensiteten
- b) Våglängden hos ljuset
- c) Fasen

I konventionell fotografi använder vi oss endast av de två första egenskaperna, varvid bilden registreras på den fotografiska emulsionen genom intensitetsfördelning hos det ljus som reflekteras av föremålet och projiceras genom objektiv eller speglar som en bild på filmen.

I holografin å andra sidan använder vi oss av ljusets fasinnehåll för att registrera bildinformationen från objektet, dvs läget för de olika delarna av objektet återges genom fasdifferensen hos de ljusvågor, som släpptes igenom eller reflekterades av objektet. (Detta återkommer vi till längre fram).

2. LASERSTRÄLNING

För att fasan i ljusvågen, som reflekterades av ett föremål, skall ge information om föremålets läge måste det finnas en fast fasrelation mellan de vågor som utsändes av ljuskällan.

I konventionella ljuskällor (glödlampor och lysrör) alstras ljusvågorna av glödtrådens eller gasfyllningens elektroner, utan något bestämt inbördes förhållande mellan de utsända ljusvågorna. Detta kallas "inkoherent ljus".

Laserstrålen (eng Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) är en ljuskälla med en bestämd relation mellan de utsända vågorna.

- Ljus som utsänds av en laser är monokromatiskt, dvs det består av en enda våglängd eller ett mycket smalt band av våglängder.
- De exciterade atomerna i en laser stimuleras genom ljus från andra exciterade atomer, att i samma ögonblick utsända sin energi också i form av ljus; på detta sätt förstärker sig ljusvågen på vägen genom lasern och när den lämnar lasern, har strålen samma fas över hela tvärsnittet.

Ljus som uppfyller båda dessa egenskaper kallas "koherent ljus".
Varje lasertyp har en karakteristisk våglängd, t ex:

| | | | |
|-----------------|----------|----------|------------------------------|
| Heliumneonlaser | våglängd | 632,8 nm | används vid denna laboration |
| Rubinlaser | våglängd | 694,3 nm | |

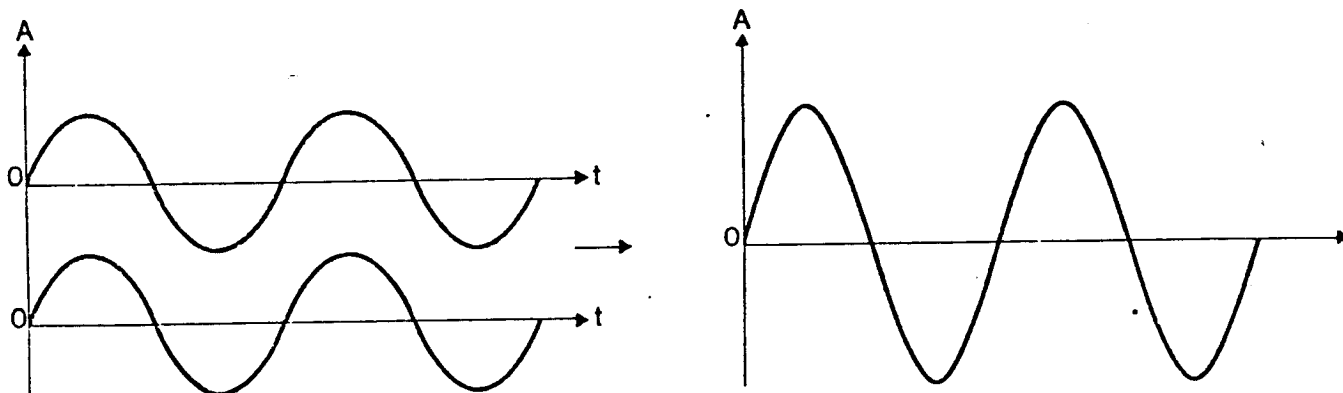


Fig. 1. Två svängningar i fas förstärker varandra ömsesidigt. Resultatet är en svängning med dubbla amplituden.

Beroende av det medium som alstrar laserstrålningen talar vi om gaslaser, t ex heliumneonlaser, kristallaser t ex rubinlaser eller halvledarlaser t ex galliumarsenidlaser.

3. INTERFERENS

För att förstå holografins teknik måste vi erinra om ett fenomen i optiken som kallas för "interferens". När två vågor av samma våglängd mötas i en viss punkt, adderas deras amplituder och då kan de tillsammans öka intensiteten i mötespunkten, neutralisera varandra eller ge någon intensitet mitt emellan.

Den maximala intensiteten erhålles då svängningarna för båda vågorna samtidigt har sin maximala amplitud med samma tecken och går genom noll samtidigt och i samma riktning (Fig. 1). Vågorna säges då vara i fas.

Maximalt upphävande inträffar då svängningarna samtidigt har sin maximala amplitud, men med motsatt tecken och samtidigt går genom noll, men i motsatt riktning (Fig. 2). Vågorna sägs då vara i motfas. Detta inträffar exempelvis då en av de två vågorna har passerat en sträcka som är ett udda antal halva våglängder större än den distans som tillryggalagts av den andra vågen.

När två monokromatiska ljusvågor möts efter att ha tillryggalagt olika distanser, kan alla möjliga mellanfall inträffa, alltifrån maximal intensitet till totalt upphävande.

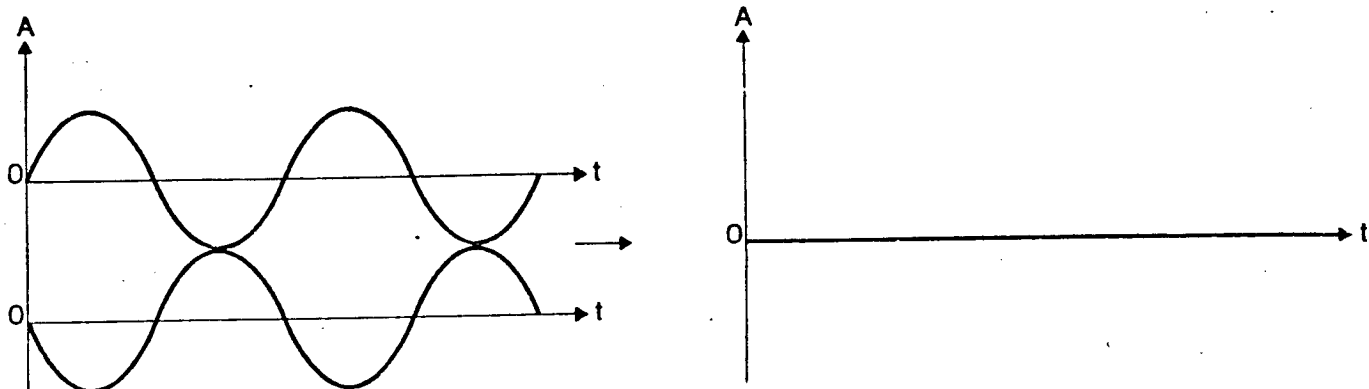


Fig. 2. Två svängningar i motfas upphäver varandra. Resultatet blir inga svängningar och amplituden blir lika med noll.

4. UPPTAGNINGSTEKNIK

Fig. 3 visar principen för den holografiska registreringstekniken. Lasern (1) ger en koherent ljusstråle (2). Denna ljusstråle transmitteras delvis och reflekteras delvis av en halvtransparent spegel (3). Den reflekterade strålen kallas för referensstrålen (4) och sprids direkt över den fotografiska plåtens hela yta (6) genom ett objektiv (5).

Den transmitterade strålen (7) görs också bredare med hjälp av objektivet (8) för att belysa det objekt, som skall holograferas (9). I varje punkt på det föremål som belyses av ljusstrålen reflekteras ljuset diffust, dvs i alla riktningar och därför även i riktning mot den fotografiska emulsionen (10).

Vid den fotografiska emulsionen överlagras alla strålar från objektet med referensstrålen. Eftersom båda härstammar från en koherent ljuskälla uppstår därvid interferens. Beroende av skillnaden i den optiska våglängden mellan strålarna från referensljuset och strålarna från objektet kommer de att ha en större eller mindre fasdifferens. Om vägskillnaden är ett jämnt antal våglängder kommer strålarna att förstärka varandra. Men om våglängdskillnaden utgör en udda multipel av halva våglängder kommer strålarna att neutralisera varandra, vilket ger minimal intensitet.

Detsamma gäller alla punkter på föremålet, varför strålar reflekteras. Vi får därför på det fotografiska materialet ställen som mottagit en större eller mindre mängd belysning, som efter framkallning resulterar i ställen med större eller mindre täthet och på detta sätt "infryser" man den informationsbärande vågfronten i det fotografiska materialet. Resultatet, den framkallade fotografiska plåten, kallas för hologram. (Fig. 4).

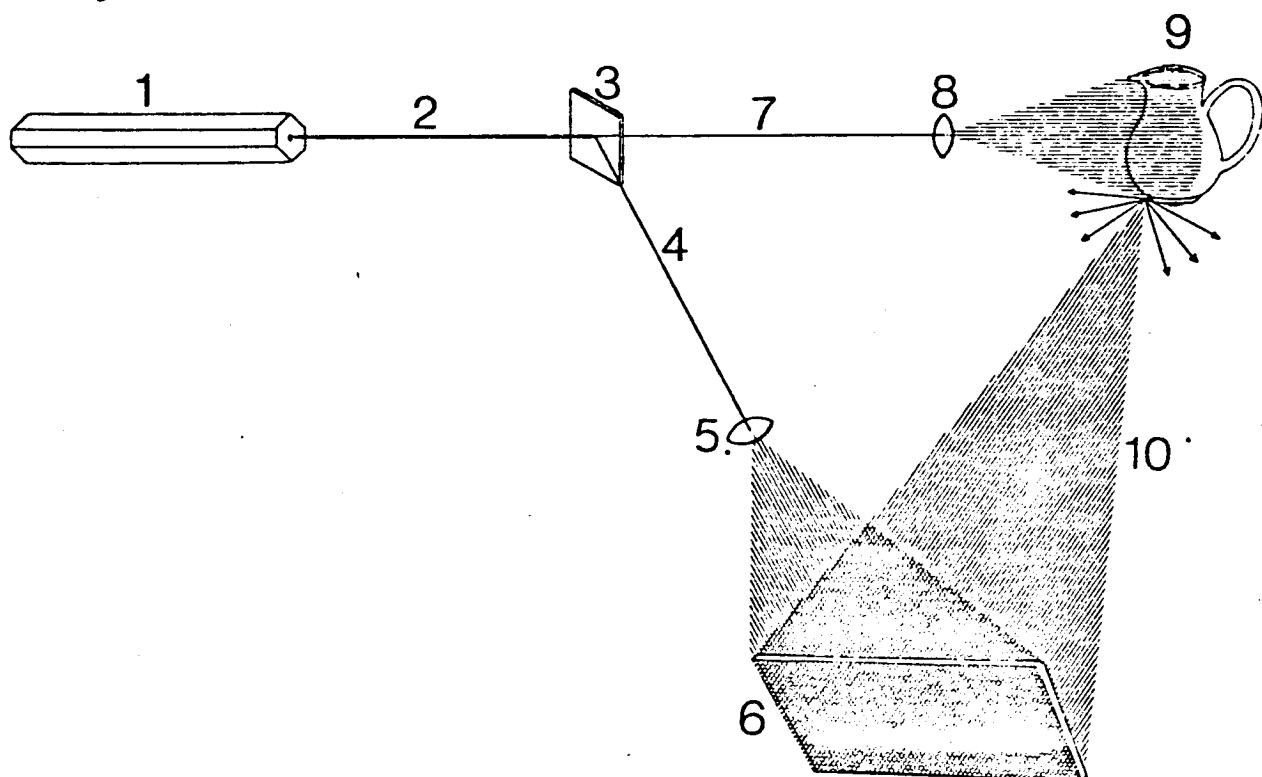


Fig. 3. Princip och uppsättning för framställning av ett hologram.

5. REKONSTRUKTION AV BILDEN

Därmed menas hur man gör bilden synlig med hjälp av lämplig belysning av hologrammet. Fig. 5 visar principen för detta arrangemang.

Strålen (2) från en laser (1) sprids genom ett objektiv (3) mot hologrammet (4) under ungefär samma vinkel, som referensstrålen hade vid upptagningen. De succesivt klara och mörka linjerna i hologrammet (Fig. 4) agerar nu som ett diffraktionsgitter för referensstrålen. De strålar som böjts av genom detta gitter och som har fått varierande amplitud, formar sig nu till ett vågmönster (5) bakom hologrammet, som är identiskt med det som objektet skulle ha skickat vidare genom plåten vid upptagningen om emulsionen inte hade varit ljusabsorberande.

När detta vågmönster når ögat (6) kan detta inte avgöra om bilden härstammar direkt från föremålet eller om den har uppstått genom strålar som böjts av i hologrammet. Man ser bilden av föremålet (7) i föremålets ursprungliga läge. Vi observerar även att det förutom den virtuella bilden (7) i föremålets ursprungliga läge också kan finnas en reell bild (8) framför hologrammet (sett från observatören).

5. DEN REKONSTRUERADE BILDENS EGENSKAPER

a) Den rekonstruerade bilden är faktiskt tredimensionell, eftersom varje punkt i det fotografiska materialet "ser" objektet från en annan synvinkel. Då observatören flyttar sig i förhållande till hologrammet, kommer han varje gång att se bilden i ett annat perspektiv, nämligen det perspektiv som "setts" av just den speciella delen av den fotografiska emulsionen.

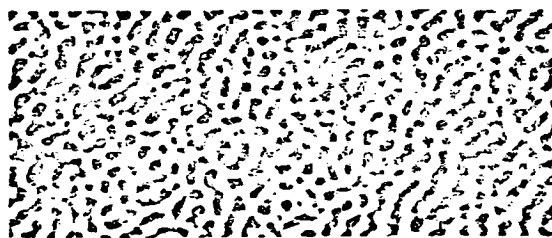


Fig. 4. Mikrofoto av ett hologram (800 x)

- b) Varje liten del av det fotografiska materialet innehåller en bild, givetvis så som det "setts" från samma synvinkel (Fig. 6). Hologrammet kan delas i små bitar, men var och en av dem kan dock fortfarande rekonstruera en hel bild av objektet. Detta exempel ger ett begrepp om hologrammens stora informationslagringskapacitet.
- Användning: LAGRING AV DATA PÅ EN MYCKET LITEN YTA.

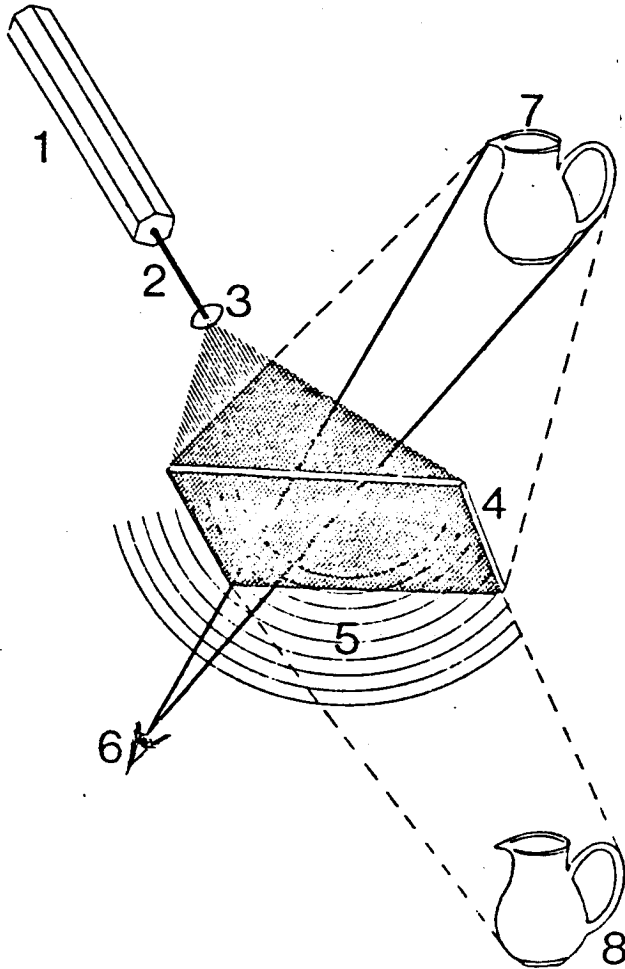


Fig. 5. Bildens rekonstruktion.

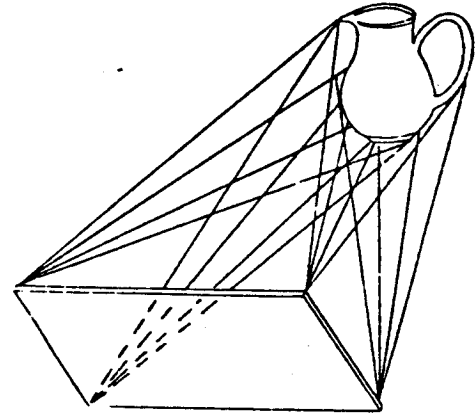


Fig. 6. Varje ställe på det fotografiska materialet "ser" föremålet från en annan vinkel.

- c) Bilden rekonstrueras genom ljusets diffraktion vid hologrammets ljusa och mörka strukturer. Dessa förändrar ljusets amplitud, därför kallas de på absorberande silver uppbyggda hologram "amplitudhologram". En liknande diffraktion erhåller man, om dessa strukturer inte absorberar utan inför skillnader i optisk väglängd. I detta fall beror diffraktionen på förändringar i ljusets fas och därför kallas sådana för blotta ögat helt transparenta hologram "fashologram".

- d) Eftersom de ljuskällor som används för rekonstruktion är monokromatiska, är även bilden monokromatisk.
- e) Eftersom interferens under rekonstruktionen endast förekommer mellan ställen på det fotografiska materialet, som ligger relativt nära varandra, behöver ljuskällan endast ha en begränsad grad av koherens, en laser är därför inte nödvändig. En någorlunda monokromatisk punkt-ljuskälla är ofta tillräcklig. Man kan exempelvis använda en kvicksilverlampa; med ett monokromatiskt filter för att skilja ut en enda spektrallinje får den tillräcklig koherens.

7. FOTOGRAFISKA MATERIAL

Fotografiska material för holografi måste ha följande två egenskaper:

- a) Tillräcklig färgkänslighet över ett bestämt våglängdsområde.
- b) Mycket hög upplösningförmåga.

a) Färgkänslighet

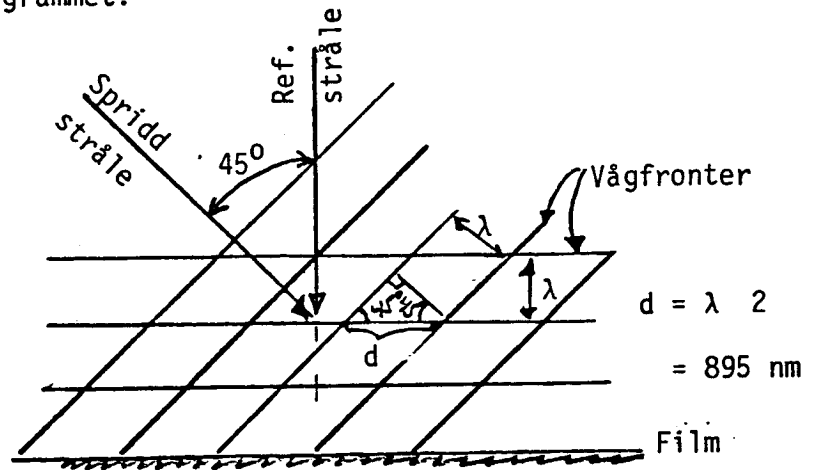
För att kunna göra en upptagning med ljuset från en laser måste materialet vara sensibiliserat för dess monokromatiska strålning. Eftersom de flesta monokromatiska material redan överskridit sin maximala känslighet vid 632,8 nm, och i alla fall vid 694,3 nm, erfordras specialsensibilisering. Agfa-Gevaert levererar ett antal specialsensibiliserade emulsioner, som tillåter exponeringar på bråkdeln av en sekund.

b) Upplösningförmåga

I hologrammet uppträder en linje med hög täthet eller en med låg täthet varje gång när skillnaden i våglängd mellan referensstrålen och objektstrålen är en multipel av hela våglängden eller en udda multipel av halva våglängden.

Om θ är vinkeln mellan referensstrålen och objektstrålen när de infaller symmetriskt på det fotografiska materialet, då är avståndet d mellan två mörka linjer i hologrammet:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$$



varvid λ = våglängden hos den använda laserstrålen. Vid 45° är det ett avstånd på $0,8 \mu$. Detta kan endast återges av en fotografisk emulsion med en upplösningsförmåga av minst 1.250 linjer per mm. Med en mindre vinkel mellan referensstrålen och objektstrålen kan en lägre upplösningsförmåga vara tillräcklig.

Som bekant står hög känslighet och hög upplösningsförmåga i ett visst motsatsförhållande till varandra då det gäller en fotografisk emulsion. Följande faktorer är därför avgörande vid val av lämpligt fotografiskt material:

- den tillgängliga ljusintensiteten (laser)
- den tillgängliga exponeringen (koherensstabilitet hos vissa lasrar och fysikalisk stabilitet hos uppsättningen) samt
- fordringarna på bildkvalitet.

8. ANVÄNDNINGSSOMRADEN.

1. Den kanske mest närliggande användningen av holografin torde vara framställningen av tredimensionella bilder. Att presentera bilder holografiskt kan bli mycket betydelsefullt som publikationsmedium, för åskådningsmaterial i skolor etc.

2. Ett annat användningsområde är detektering eller mätning av små deformationer med hjälp av holografisk interferometri.

Denna metod består i holografering av objektet med reflekterat ljus; exponeringen delas därvid i två lika delar. Objektet exponeras först halva den normala tiden. Därefter utsätts objektet för någon liten förändring, varefter den andra exponeringen sker.

Dessa små förändringar kan härröra från:

- krafter (t ex skillnad i tryck eller temperatur) som påverkar objektet
- förändringar i själva objektet (t ex tillväxt hos plantor)

Därför att båda hologrammen registreras på samma plåt och sedan rekonstrueras samtidigt, kommer de rekonstruerade vågfronterna att adderas. Där objektet har deformerats mellan de båda exponeringarna uppträder sedan också en förskjutning mellan de båda vågfronterna och interferens kan uppträda mellan dem. Denna interferens syns som grova fransar på objektets rekonstruerade bild. Metoden kallas på engelska "double-exposure hologram interferometry". Vi skall illustrera det med några exempel.

Det är självklart att placeringen av såväl objekt som upptagningsmaterial måste vara exakt densamma under de båda exponeringarna, med undantag för precis de förändringar man vill observera.

B. Fig. 9 illustrerar en användning av interferometrin. Två upptagningar gjordes på samma plåt eller film. Den första av ett bildäck vid normalt tryck och den andra av samma däck vid högre tryck.



Fig. 9. Holografisk analys av bildäcksdeformation för att avslöja strukturella defekter.

Ändringen i tryck medförde följande deformation:

- väntad normal expansion p g a fel i däck.

Antalet interferenslinjer möjliggör en mätning av storleken av deformationen genom att använda ekvationen

$$x = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

där x = deformationen av objektet

n = antalet interferenslinjer

λ = laserstrålningens våglängd

- Man kan också ta bara en exponering av objektet, framkalla hologrammet och rekonstruera det så att objektet själv och dess holografiska bild överlagras varandra exakt. Inför man nu en förändring i objektet, förskjuts dess vågfront i förhållande till den som är lagrad i hologrammet och interferensen gör att man ser mörka fransar på objektet. Med denna metod, som på engelska kallas för "real-time hologram interferometry", kan man alltså studera förändringar samtidigt som de införs.

C. Tillämpning av holografin på ett fasobjekt. Ett fasobjekt är ett objekt som inte visar några skillnader i optisk absorption mellan sina olika komponenter eller tillstånd, men olikheter i brytningsindex. Exempelvis är luft ett fasobjekt.

Då man framställer ett dubbelhologram av luft med en temperaturgradient, t ex i omgivningen av en ljuslåga, medför temperaturfördelningen i luften en motsvarande fördelning av brytningsindex och därmed i optisk väglängd. Tar man först en hologramexponering utan låga, sedan tänder lågan och tar den andra exponeringen, så syns fasförskjutningen mellan de två tillstånden som interferensfransar i den holografiska bilden.

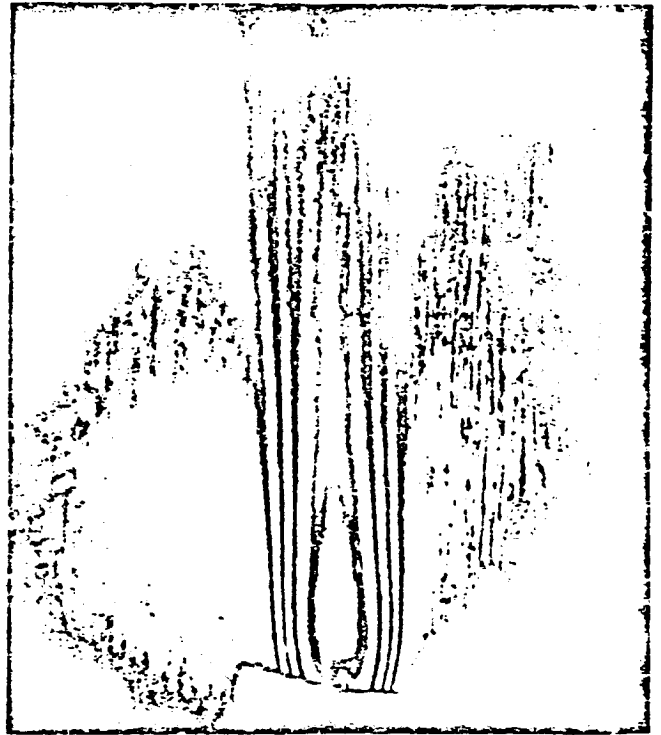


Fig. 10. Temperaturfördelning i luften omkring en ljuslåga som ett exempel på interferometrisk tillämpning av holografin på ett fasobjekt. (P. Smigiel-ski, Institut Franco-Ablemandde Recherches, Saint-Louis, Frankrike.)

3. En intressant användning av holografin är objektidentifiering. Denna nya metod för läsning av bokstäver, datasortering och liknande dataoperationer kan bli speciellt användbar. Fig. 11 visar schematiskt en lämplig uppställning.

V är en transparent med de data som skall behandlas (ritning eller text). V är placerat i fokalplanet för objektiv L_1 , vilket sedan V belysts av en laserstråle, transformerar varje bildpunkt hos V till en parallell

stråle. Denna operation är en Fourier-transformation på optisk väg. Ljusstrålen passerar vid H ett ortsfrekvensfilter, som i själva verket är ett hologram med data som skall sökas i V. Om den sökta informationen finns med någonstans i V, så genererar filtret H en stråle som sedan fokuseras på skärmen S med hjälp av objektivet L_2 till en ljuspunkt, vars läge motsvarar den punkt där informationen finns i originalet V.

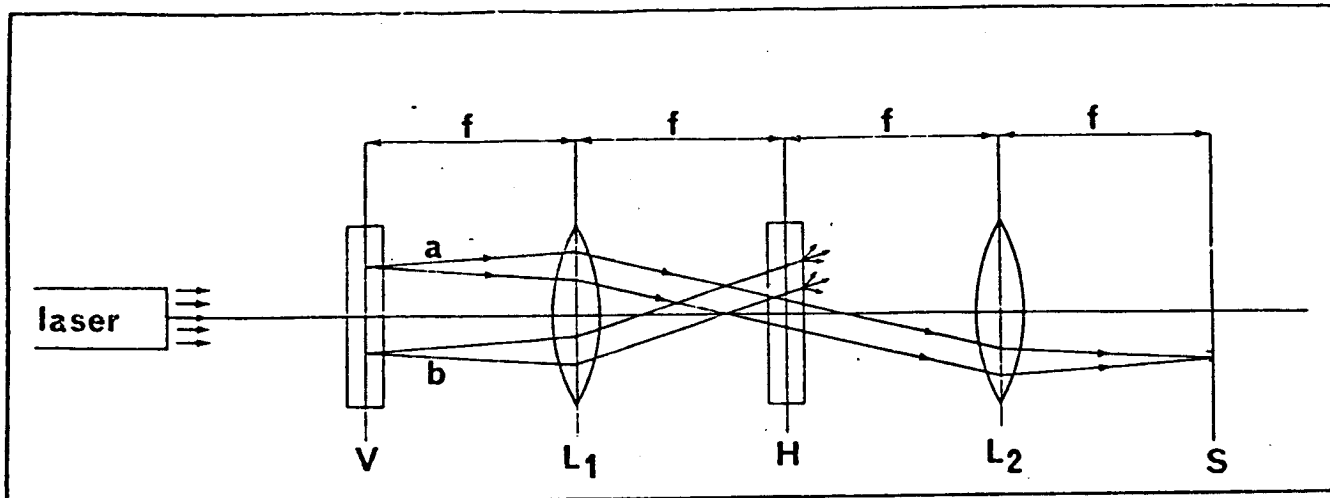


Fig. 1.. Objektidentifiering.

- a) Informationen hos denna ljusstråle motsvarar den som söks genom filtret H. H genererar en stråle som fokuseras på en skärm i en punkt som anger läget för informationen i V.
- b) Informationen hos denna ljusstråle korresponderar inte mot den hos ortsfrekvensfiltret.

Denna metod är ett nytt sätt för identifiering av fingeravtryck.

Endast när en distinkt ljus fläck syns på skärmen kan man dra den slutsatsen att det identiska fingeravtrycket har kommit fram.

4. Bildkopiering

Slutligen användes holografin också för framställning av tryckta kretsar. Vanligen kopierar man en hel serie identiskt lika bilder i ett plan med hjälp av en repeterkamera. Samma resultat kan man få genom att placera ett hologram i avbildningsstrålgången för det föremål som skall mångfaldigas. Detta hologram är gjort efter en matris av punkter eller punktkällor.

Fig. 13 visar anordningen, där en reellbild f av det objekt b som skall mångfaldigas (originalet) intar referenskällans ursprungliga läge. Genom att strålen som avbildar objekt b till f tjänar som rekonstruktionsstråle för hologram d får varje rekonstruerad punkt i matris e samma form som bild f . Bokstäverna PZH mångfaldigade enligt denna metod visas i Fig. 14.

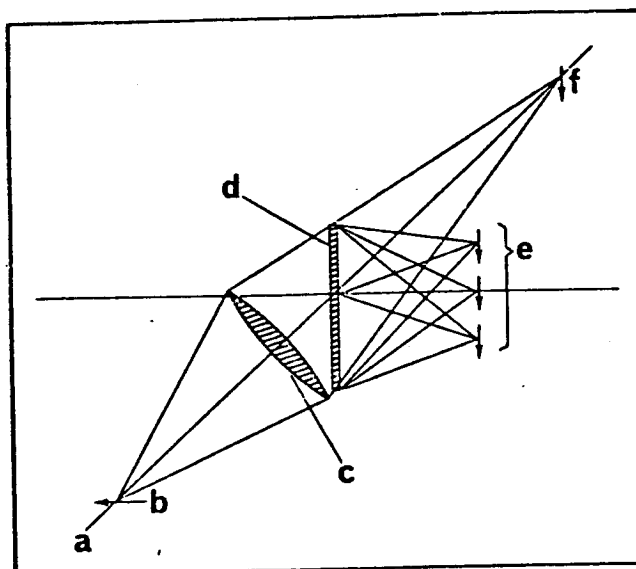


Fig. 13. Schematiskt arrangemang för bildkopiering. (Dr G Groh, Philips Zentrallab i Hamburg).

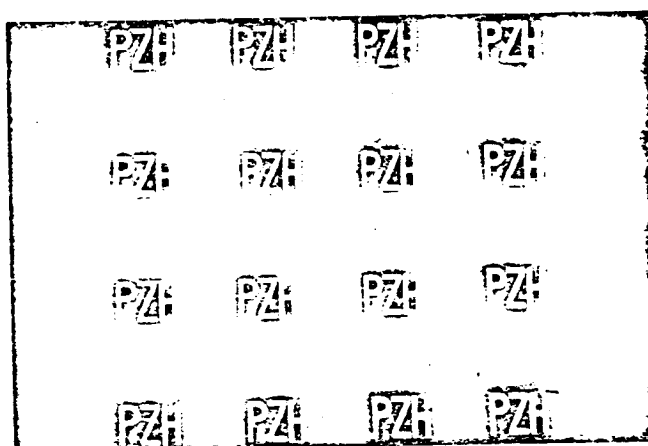


Fig. 14. Bildkopiering med hjälp av punkthologram. (Dr G Groh, Philips Zentrallab i Hamburg).

INSTUDERINGSFRÅGOR TILL LABORATION O10.

1. Vilka av ljusets egenskaper registreras vid konventionell fotografi respektive holografi?
2. Varför används laser som ljuskälla vid framställning av ett hologram?
3. Vad menas med koherent ljus?
4. Vid konventionell fotografi registreras en punkt på objektet som en punkt på fotoplåten. Hur registreras en punkt på objektet vid holografi?
5. Varför innehåller varje liten del av hologrammet en bild av hela objektet?