



NORGE

[NO]

**STYRET
FOR DET INDUSTRIELLE
RETTSVERN**

[B] (11) UTLEGNINGSSKRIFT Nr. 142016

(51) Int. Cl.³ G 03 H 1/00, G 03 H 3/00

(21) Patentsøknad nr. 780833

(22) Inngitt 09.03.78

(23) Løpedag 09.03.78

(41) Alment tilgjengelig fra 11.09.79

(44) Søknaden utlagt, utlegningsskrift utgitt 03.03.80

(30) Prioritet begjært Ingen.

(54) Oppfinnelsens benevnelse Fremgangsmåte ved holografisk opptak og rekonstruksjon av en bølgefront.

(71)(73) Søker/Patenthaver
SENTRALINSTITUTT FOR INDUSTRIELL FORSKNING,
Forskningsveien 1,
Oslo 3

(72) Oppfinner
KADRI OKAN ERSOY,
1481 Li.

(74) Fullmektig
Siv.ing. Rolf Larsen,
Bryn & Aarflot A/S, Oslo.

(56) Anførte publikasjoner
USA (US) patent nr. 3639029, 3639033,
3813139

Det fundamentale problem innen holografi er å nedtegne en objektbølgefront og senere rekonstruere denne fysisk. Den grunnleggende problemløsningen er gitt av D. Gabor (Nature 161 (1948) 777), og innebærer blanding av objektbølgen $U_o(x,y)$ med en planperpendikulær referansebølge $U_r(x,y)$ for nedtegnelse av den totale intensiteten $I(x,y)$ på en interferensmønsterbærer:

$$I(x,y) = |U_r + U_o|^2 = |U_r|^2 + |U_o|^2 + U_r^* U_o + U_r U_o^* \quad (1)$$

Etter fremkalling utgjør bæreren hologrammet av objektbølgefronten. Ved innretting av en plan rekonstruksjonsbølge $U_s(x,y)$ normalt på hologrammet blir objektbølgen rekonstruert. Den rekonstruerte objektbølgen $U(x,y)$ ut fra hologrammet er generelt gitt ved:

$$U(x,y) = U_s |U_r|^2 + U_s |U_o|^2 + U_r U_s U_o^* + U_r^* U_s U_o \quad (2)$$

eller:

$$U(x,y) = U_r |U_r|^2 + U_r |U_o|^2 + U_r^2 U_o^* + |U_r|^2 U_o \quad (3)$$

når $U_s(x,y) = U_r(x,y)$ ifølge Gabor.

Hvert av de to siste leddene i ligning (2) representerer ett virtuelt og ett reelt rekonstruert objektbilde, eller det ene representerer ett virtuelt og det annet ett reelt bilde, alt avhengig av referanse- og rekonstruksjonsbølgene (R.W. Meier, J. Opt. Soc. Am. 56 (1966) 219). De tilsvarende uttrykkene i ligning (3) resulterer i ett virtuelt bilde og ett reelt bilde som overlapper hverandre.

Problemet med bildeoverlapping ble løst av E.N. Leith og J. Upatnieks (J. Opt. Soc. Am. 52 (1962) 1123) ved at det som referanse- og rekonstruksjonsbølge ble brukt en plan, men ikke perpendikulær referanse- og rekonstruksjonsbølge:

$$U_r = U_s = A e^{jk(\alpha x + \beta y + \gamma z)} \quad (4)$$

hvor A = amplituden,

$k = 2\pi/\lambda$ med λ = bølgelengden, og

α, β, γ er cosinusverdiene til retningsvinkelen.

Dette uttrykket innsatt i ligning (2) eller (3) viser at alle rekonstruksjonsbildene er skilt fra hverandre i rommet.

De samme resultater oppnås i syntetisk holografi når den klassiske holografiske teknikk kopieres. Prinsippet for syntetisk holografi går som kjent ut på sampling av objektbølgefronten, beregning av tilsvarende hologrampunkter og nedtegnelse av disse på det materiale som skal utgjøre hologrammet. Ved belysning av hologrammet rekonstrueres bølgefronten fysisk som virtuelle, reelle og høyere ordens bilder.

Siden syntetisk holografi ikke er begrenset til bruk av fysiske bølger under fremstillingen av hologrammet, har det vist seg mulig å fremstille hologrammer som gir rekonstruksjon av bare ett synlig bilde. Ved kineformetoden (L.B. Lesem, P.M. Hirsch, J. A. Jordan, Jr. IBM J. res. Develop. 13 (1969) 150) hvor den rekonstruerte bølgen ut fra hologrammet beskrives som

$$U(x, y) = A(x, y, z) e^{j\phi(x, y, z)} \quad (5)$$

antas at informasjonen hovedsakelig kommer fra fasen $\phi(x, y, z)$, idet amplituden $A(x, y, z)$ betraktes som konstant. Informasjon om fasen blir da kvantifisert i et bestemt antall gråtoner som så gjengis som hologrampunkter på fotografisk film. Denne metoden er imidlertid ganske arbeidskrevende. En annen løsning beskrevet av D.C. Chu, J.R. Fienup og J.W. Goodman (Appl. Opt. 12 (1973) 1386) går ut på å bruke en interferensmønsterbærer med to fotografiske emulsjoner for separat kontroll av amplitude og fase. Imidlertid er det vanskelig å tilpasse de to emulsjonene innbyrdes. Ved

de øvrige kjente metodene for syntetisk holografi reproduseres både de reelle og virtuelle bildene, og i tillegg også høyere ordens bilder. Det har derfor lenge vært et åpenbart behov for en enkel holografisk metode som resulterer i mer tilfredsstillende rekonstruksjon av objektbølgen.

Hensikten med foreliggende oppfinnelse er å tilveiebringe en generell og enkel løsning på det her angitte problemet.

En nærmere betraktning av de metodene for syntetisk holografi som er forskjellig fra metodene for fysisk holografi slik prinsippet ble videreført av Leith og Upatniek, viser at de rekonstruerte bildepar ikke har samme opprinnelse, men er i syntetisk holografi forårsaket av de begrensninger som ligger i metodene for nedtegning av hologrampunktene. Med en planperpendikulær rekonstruksjonsbølge observeres at det virtuelle og reelle bildet står symmetrisk på hver side av hologrammet. Hvis man forestiller seg objektbølgen som en sum av kulebølger med utspring i individuelle objektpunkter, vil nemlig rekonstruerte objektpunkter som er symmetriske speilbilder av hverandre, svare til objektbølger i hologrammet med samme amplitude og motsatt fase. Det erkjennes således at det ved valg av et hologrampunkt benevnt i , som tilsvarende fasen ϕ_i for det virtuelle bildet, vil det samme punktet svare til fasen $-\phi_i$ for det reelle bildet.

Ovennevnte erkjennelse leder til den konklusjon at for å bli kvitt det ene av de rekonstruerte bildene, må man ødelegge nevnte bildesymmetri. En nærliggende problemløsning kunne basere seg på teknikken ifølge Leith og Upatniek, ved at geometrien under opptak og rekonstruksjon ble endret ytterligere i forhold til Gabor's system. En endret vinkel inn på hologrammet for den plane referanse- og rekonstruksjonsbølgen vil imidlertid kun forstyrre geometrien og derved resultere i rekonstruerte bilder som står i andre posisjoner enn før.

Fremgangsmåten ifølge foreliggende oppfinnelse er et alternativ til Leith og Upatniek's teknikk.

Nærmere bestemt angår således denne oppfinnelse en fremgangsmåte for fremstilling av et hologram av en objektbølgefront og rekonstruksjon av denne ved hjelp av en sfærisk referanse/rekonstruksjonsbølge. De nye og særegne trekk ved fremgangsmåten

ifølge oppfinnelsen består i første rekke i at referanse/rekonstruksjonsbølgens kilde plasseres i liten avstand fra hologrammet, og at denne avstand justeres under rekonstruksjonen, hvorved bare én rekonstruert avbildning fokuseres med nevnte kilde i en gitt posisjon mens øvrige avbildninger samtidig defokuseres, idet nevnte avstand bestemmes på basis av det signal/støy-forhold som er ønsket i den fokuserte avbildningens posisjon, samt geometriske størrelser som i og for seg er kjent å føre til defokusering, så som størrelsen av hologrammet, avstand mellom hologrammet og objektet, og utstrekningen av hologrampunktene. Disse trekk vil bli diskutert mer inngående i det følgende.

Med den her angitte løsning er det således tilveiebragt en meget enkel metode som fundamentalt kan løse problemet med de mange gjensidig forstyrrende rekonstruerte bildene.

Det følger en rekke fordeler med det å ha kun ett synlig rekonstruert bilde. Her skal kort nevnes at på grunn av de små hologrampunktene som brukes i syntetisk holografi, er volumet i rommet hvor objektet kan utformes, diffraksjonsbegrenset. Hvis det derfor bare er ett rekonstruert bilde, kan dette volumet gjøres mye større. Videre er det lett å filtrere bort rekonstruksjonsbølgen eller bruke den til kopiering av hologrammet på kjent måte. Det rekonstruerte bildets posisjon og dets størrelse er svært følsom overfor forandringer av fokalpunktets posisjon, slik at bildet lett kan gjøres større eller mindre.

Oppfinnelsen skal nå beskrives nærmere ved hjelp av utførelses-eksempler vedrørende optisk, syntetisk holografi. Det vises til tegningen og de fotografiske illustrasjonene av diverse rekonstruksjoner, hvor:

Figur 1 er en skisse av et system for utførelse av fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen,

Figur 2 illustrerer et resultat ifølge kjent teknikk ved bruk av planperpendikulær referanse/rekonstruksjonsbølge,

Figur 3-6 illustrerer resultater ifølge oppfinnelsen,

- Figur 7-11 viser resultater etter rekonstruksjon med planperpendikulær bølge, og etter rekonstruksjon ifølge oppfinnelsen, hvor hologrammer ifølge oppfinnelsen ble belyst helt eller delvis,
- Figur 12 viser et resultat ifølge oppfinnelsen, hvor bildeforvrengning er tilstrebet,
- Figur 13 viser en samtidig rekonstruksjon ved hjelp av to forskjellige hologrammer ifølge oppfinnelsen, og
- Figur 14-15 viser to forskjellige rekonstruksjoner ifølge oppfinnelsen, av ett og samme objekt.

På figur 1 betegner 1 en laser, 2 et linsesystem, 3 et hologram, 4 en blender i linsesystemets fokuspunkt og 5 et rekonstruert reelt bilde av et syntetisk objekt. Brennvidden er benevnt f , og avstanden mellom hologrammet og fokuspunktet er benevnt z_c . Til venstre er angitt koordinatretningene x, y, z . Linsesystemet 2 er flyttbart i z -retningen. Hologrammene ble laget ved hjelp av et scanning elektronmikroskop slik som angitt i norsk patentskrift nr. 138.161. Hologrammene var alle av størrelse 2×2 mm, og størrelsen av hologrampunktene var i størrelsesorden $1 \mu\text{m}$.

På figur 2 er vist rekonstruksjon av et syntetisk objektpunkt. Både syntetisk fremstilling av hologrammet og rekonstruksjon av punktet ble foretatt etter kjente prinsipper ved hjelp av en planperpendikulær referanse- og rekonstruksjonsbølge. I midten av fotografiet dominerer bildet av rekonstruksjonsbølgen. Til høyre for rekonstruksjonsbølgen kan vi se et noe overeksponert reelt bilde av objektpunktet samt høyere ordens bilder. Til venstre for rekonstruksjonsbølgen ser vi det virtuelle bildet og høyere ordens bilder.

I forbindelse med figur 3 ble det brukt et hologram som er fremstilt syntetisk ved hjelp av fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen. Objektet er også her et punkt, og som syntetisk referansebølge ble brukt en kulebølge med utspring i en punktkilde 5 cm til høyre for hologramplanet. Rekonstruksjonen ble foretatt ved hjelp av oppstillingen vist på figur 1 uten blender, og avstanden mel-

lom hologrammet og fokalpunktet var 5 cm. Både under fremstilling av hologrammet og rekonstruksjon av objektpunktet var fokalpunktets x- og y-koordinater sammenfallende med de tilsvarende koordinatene for hologrammets senterpunkt. Den mørke firkanten som kommer til syne, er det forstørrede bildet av hologrammet. Rekonstruksjonsbølgen dekker omtrent hele fotografiet. Fotografiet viser at bare ett av objektbildene ble rekonstruert i denne oppstillingen, mens svært mange forskjellige ordens bilder lot seg fokusere ett og ett når fokalpunktet ble flyttet litt i z-retningen. Det ble konstatert at når ett bilde ble fokusert, forsvant de andre i nærheten av hologrammet.

På figur 4 er vist de samme forhold som på figur 3, men under rekonstruksjonen ble rekonstruksjonsbølgen og 0. ordens bilder filtrert bort ved hjelp av blanderen 4. Det rekonstruerte bildet fremtrer klart uten forstyrrelser.

I forbindelse med figur 5 ble hologrammet fremstilt ut fra et objektpunkt som ble plassert forholdsvis nær hologramplanet. Avstanden mellom hologrammet og fokalpunktet var 3 cm under hologramberegningen og under rekonstruksjonen. Foruten ett bilde av objektpunktet viser fotografiet sirkulære linjer som er forårsaket av interferens mellom rekonstruksjonsbølgen og bølgen fra det rekonstruerte objektet, fordi objektpunktet ble lagt så nær hologramplanet. Under flytting av fokalpunktet ble mange høyere ordens bilder fokusert, ett og ett om gangen, men dog et mindre totalt antall enn i forbindelse med figur 3.

Figur 6 viser samme type linjer som på figur 5, men hologrammet i forbindelse med figur 6 er av et objektpunkt enda nærmere hologramplanet. Avstanden mellom hologrammet og fokalpunktet var 1 cm. At interferenslinjene her er brutt, skyldes bildet av hologrammet som ligger ovenpå linjene. Flytting av fokalpunktet viste at adskillige høyere ordens bilder lot seg fokusere enkeltvis, men dog færre enn i forbindelse med figur 5.

I forbindelse med figur 7 ble brukt samme hologram som i figur 6 men rekonstruksjonen ble foretatt med en planbølge. Det er ikke tegn til noen objektpunktbilder.

I forbindelse med figur 8 ble brukt samme hologram som i figur 3, men rekonstruksjonen ble foretatt med en planbølge. Uskarpe reelle og virtuelle bilder kan konstateres til høyre, henholdsvis til venstre for bildet av rekonstruksjonsbølgen.

På figur 9 er vist samme forhold som på figur 8, bortsett fra at den plane rekonstruksjonsbølgen ble rettet mot bare en del av hologrammet. Det reelle og virtuelle bildet sees klarere her enn på figur 8. Det kan konstateres at en liten del av hologrammet bedre tilfredsstiller de krav som stilles i forbindelse med bruk av en planbølge, enn hva hele hologrammet gjør.

I forbindelse med figur 10 ble den plane rekonstruksjonsbølgen rettet enda mer ut mot kantene av hologrammet enn i figur 9. På dette fotografiet fremtrer også høyere ordens bilder av objekt-punktet.

Rekonstruksjonen på figur 11 ble foretatt med det samme hologrammet som i figur 5, og også her ved hjelp av et linsesystem. Imidlertid ble hologrammet under rekonstruksjonen plassert nærmere fokuspunktet, slik at bare en meget liten del av hologrammet ble belyst. I sammenligning med figur 10 viser figur 11 adskillige høyere ordens bilder av objekt-punktet.

På figur 12 er vist rekonstruksjon med hologrammet som ble brukt i forbindelse med figur 6, og ved hjelp av linsesystemet. Før bildet ble tatt ble fokuspunktet flyttet ganske lite i forskjellige avstander fra hologrammet. Det ble igjen funnet at det er lett å fokusere flere forskjellige ordens bilder, og ett om gangen, ved å flytte linsen i z-retningen. Igjen ble konstatert at når ett bilde ble fokusert, forsvant de andre. Ved sammenligning med de foregående forsøk ble det konstatert at det å hoppe fra en orden til en annen, blir vanskeligere jo nærmere fokuspunktet legges til hologrammet under fremstillingen av dette. Flytting av hologrammet i x- og y-retningene forandret derimot bare posisjonen til det fokuserte bildet, og betydelige avvik inntreder når bildets posisjon var langt fra den ideelle posisjonen. Fotografiet viser et slikt forstørret og forvrengt bilde.

Rekonstruksjonen på figur 13 ble oppnådd ved å utvide laserstrålen ved hjelp av en kollimator, slik at begge hologrammene med fokalpunktet 3 og 5 cm fra hologramplanet ble belyst samtidig. Det kan sees at bildene for de to hologrammene er av forskjellig orden på grunn av deres posisjoner i forhold til sine hologrammer.

Figur 14 viser rekonstruksjonen av et mer komplisert objekt som består av et antall objektpunkter som tilsammen danner tallet 3. Hologrammet ble fremstilt med fokalpunktet i avstand 3 cm fra hologramplanet, idet x- og y-koordinatene for fokalpunktet var de samme som for hologrammets sentrum.

På figur 15 er vist rekonstruksjon av det samme objektet som på figur 14, men fokusert i en større avstand fra hologrammet ved flytting av fokalpunktet. Således viste det seg at det er enkelt å kontrollere forstørrelsen av bildet, ved en meget liten justering av fokalpunktets posisjon.

Hologrammene ble som nevnt fremstilt etter den metoden som er beskrevet i norsk patentskrift nr. 138.161. I korthet går denne metoden ut på å betrakte hvert hologrampunkt i relasjon til objektpunktets fase og amplitude, og for fasen bestemme posisjonene til hologrampunktene ved justering av lengden av radiusvektor fra objektpunktet til hvert hologrampunkt ved bruk av fasen i objektpunktet og fasen til referansebølgen på hologrampunktene, og for amplituden bestemme antall hologrampunkter for objektpunktet slik at dette antallet er proporsjonalt med amplituden i objektpunktet. Ifølge dette velges posisjonen til hvert hologrampunkt $(x_1, y_1, 0)$ ut fra ligningen:

$$\phi_1(x_1, y_1) + kr_{01} = 2\pi n + \phi_0 \quad (6)$$

hvor ϕ_1 er referansebølgens fase i hologrampunktets posisjon, $k = 2\pi/\lambda$ hvor λ er bølgelengden, n er et helt tall, ϕ_0 er fasen til objektpunktet med posisjonskoordinater (x_0, y_0, z_0) og hvor radiusvektorlengde

$$r_{01} = \pm \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + z_0^2} \quad (7)$$

idet plusstegnet skal brukes hvis en reell rekonstruksjon av objektet er ønsket, mens minustegnet skal brukes for en virtuell rekonstruksjon.

Ved bruk av en sfærisk referansebølge definert ved hjelp av et linsesystem som beskrevet foran i forbindelse med rekonstruksjon, som vist ved en del av illustrasjonene, og med bølgens utspring i posisjonen (x_c, y_c, z_c) for fokuspunktet, ble fasen ϕ_i for referansebølgen under hologramfremstillingen beskrevet som:

$$\phi_i = kr_{ci} \quad (8)$$

hvor

$$r_{ci} = \pm \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + z_c^2}, \quad (9)$$

idet plusstegnet brukes hvis fokuspunktet plasseres foran hologrammet, og minustegnet brukes hvis fokuspunktet plasseres like bak hologrammet slik det ble gjort i de foran nevnte eksempler.

Nå kan ligning (6) skrives som:

$$r_{ci} + r_{oi} = n\lambda + \phi_0 \lambda / 2\pi \quad (10)$$

Ligning (10) ble tilfredsstilt ved at vi begynte med en vilkårlig posisjon for hologrampunktene. Derved tilfredsstiltes

$$r_{ci} + r_{oi} = n\lambda + \phi_0 \lambda / 2\pi + B \quad (11)$$

hvor B er en konstant. Hologrampunktene ble så flyttet en avstand Δ i en definert retning. I nedenstående eksempel flyttes Δ i x-retningen, slik at ligning (10) er tilfredsstilt. Da er de nye lengdene av radiusvektor:

$$r_{oi}^1 = \sqrt{r_{oi}^2 - 2X\Delta + \Delta^2} \quad (12)$$

$$r_{ci}^1 = \sqrt{r_{ci}^2 - 2X_c\Delta + \Delta^2} \quad (13)$$

hvor $X = x_o - x_i$ (14)

$$X_c = x_c - x_i \quad (15)$$

Lengdene $r_{oi}^1 + r_{ci}^1$ tilfredsstiller

$$r_{ci}^1 + r_{oi}^1 = r_{ci} + r_{oi} - B \quad (16)$$

Ved å løse ligning (16) med hensyn på Δ , fås:

$$\Delta = C_1 \left[1 - \sqrt{1 - C_2/C_1} \right] \quad (17)$$

hvor $C_1 = F_1/F_2$ (18)

$$C_2 = F_3/F_1 \quad (19)$$

$$F_1 = F_4(X + X_c) + Xr_{ci}^2 + X_cr_{oi}^2 \quad (20)$$

$$F_2 = (r_{oi} + r_{ci})^2 - (X - X_c)^2 - 2F_5 \quad (21)$$

$$F_3 = 2F_5r_{oi}r_{ci} - F_5^2 \quad (22)$$

$$F_4 = r_{oi}r_{ci} - F_5 \quad (23)$$

$$F_5 = -B^2/2 + B(r_{oi} + r_{ci}) \quad (24)$$

Vi legger merke til at amplitudemodulasjon fremdeles oppnås ved å variere antall hologrampunkter for hvert objektpunkt slik at dette antallet blir proporsjonalt med amplituden i objektpunktet. Selv om amplituden til den sfæriske bølgen varierer sakte over hologrammet, kan den gjennomsnittlige effekten fra vilkårlig fordelte hologrampunkter betraktes som konstant. Hva angår hologramfremstillingen for øvrig, vises til norsk patentskrift nr.138.161.

For så å forstå hva som skjedde under eksperimentene, skal vi ved denne betraktning øke lengden på radiusvektor $r(x,y,z)$ i den paraksiale tilnærmelsen

$$r = z + \frac{x_0^2 + y_0^2 + x_1^2 + y_1^2}{2z} - \frac{xx_1 + yy_1}{z} \quad (25)$$

Hvis vi nå har en plan referansebølge som gitt ved ligning (4), kan ligning (10) skrives som:

$$x_1 \left(\alpha - \frac{x_0}{z_0} \right) + y_1 \left(\beta - \frac{y_0}{z_0} \right) + \frac{x_1^2 + y_1^2}{2z_0} = n\lambda + \frac{\emptyset \lambda}{2\pi} \quad (26)$$

hvor fortegnet til z_0 skal velges slik som ved ligning (7).

Med en sfærisk referansebølge som bestemt ved ligning (9), kan ligning (10) skrives som:

$$\begin{aligned} & -x_1 \left(\frac{x_c}{z_c} + \frac{x_0}{z_0} \right) - y_1 \left(\frac{y_c}{z_c} + \frac{y_0}{z_0} \right) + \left(\frac{x_1^2 + y_1^2}{2} \right) \left(\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_c} \right) \\ & = n\lambda + \emptyset \lambda / 2\pi - F_{oc} \end{aligned} \quad (27)$$

hvor

$$F_{oc} = z_0 + \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_0} + z_c + \frac{x_c^2 + y_c^2}{2z_c} \quad (28)$$

og hvor fortegnet til z_0 og z_c skal velges slik som ved ligningene (7) og (9).

Et objektbilde dannes når ligning (26) eller (27) er gyldig for en vilkårlig n , idet man kan se bort fra de konstante leddene $\emptyset_0 \lambda / 2\pi$ og F_{OC} . Vi ser at hvis ligning (26) er gyldig for objekt-punktet i (x_0, y_0, z_0) og for en referanse-rekonstruksjonsbølge med cosinusverdier α, β, γ til retningsvinkelen, samt for bølgelengden λ , er ligningen også gyldig for et objekt-punkt i (x'_0, y'_0, z'_0) og for en bølge med cosinusverdier α', β', γ' til retningsvinkelen, samt for bølgelengden λ' , slik at

$$z'_0 = \frac{\lambda}{\lambda'} \frac{z_0}{m} \quad (29)$$

$$x'_0 = \frac{\lambda}{\lambda'} \left[\frac{\alpha' - m\alpha}{m} z_0 + x_0 \right] \quad (30)$$

$$y'_0 = \frac{\lambda}{\lambda'} \left[\frac{\beta' - m\beta}{m} z_0 + y_0 \right] \quad (31)$$

hvor m er et helt tall og angir de forskjellige ordens bilder. Når $m = 1$, fås det reelle bildet. Når $m = -1$, fås det virtuelle bildet. Når $m = 0$, fås 0. ordens bølge, dvs. en planbølge som går i samme retning som den opprinnelige referansebølgen. Andre verdier av m tilsvarer høyere ordens bilder.

Likeledes ser vi at hvis ligning (27) er gyldig for objekt-punktet i (x_0, y_0, z_0) og for en referanse/rekonstruksjonsbølge med fokalpunkt i (x_c, y_c, z_c) og med bølgelengde λ , er ligningen også gyldig for objekt-punktet i (x'_0, y'_0, z'_0) og for en referanse/rekonstruksjonsbølge med fokalpunkt i (x'_c, y'_c, z'_c) og med bølgelengde λ' , slik at

$$\frac{1}{z'_0} = \frac{\lambda'}{\lambda} m \left(\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_c} \right) - \frac{1}{z'_c} \quad (32)$$

$$x'_0 = z'_0 \left[\frac{\lambda}{\lambda'} m \left(\frac{x_0}{z_0} + \frac{x_c}{z_c} \right) - \frac{x'_c}{z'_c} \right] \quad (33)$$

$$y'_0 = z'_0 \left[\frac{\lambda}{\lambda'} m \left(\frac{y_0}{z_0} + \frac{y_c}{z_c} \right) - \frac{y'_c}{z'_c} \right] \quad (34)$$

hvor m er et helt tall. Vi legger merke til at $m = 0$ tilsvarer en bølge som er den samme som referanse/rekonstruksjonsbølgen og som fokuseres i fokuspunktet. Hvis $z_0 \gg z_c$, og hvis vi antar at den opprinnelige referansebølgen (x_c, y_c, z_c) er den samme som referansebølgen (x'_0, y'_0, z'_0) , er bildeposisjonene med unntak av posisjonen når $m = 1$, gitt ved

$$z'_0 \approx \frac{z_c}{m-1} \quad (35)$$

$$x'_0 \approx x_c + m \frac{z'_0 x_0}{z_0} \quad (36)$$

$$y'_0 \approx y_c + m \frac{z'_0 y_0}{z_0} \quad (37)$$

Med andre ord: hvis vi legger fokuspunktet for linsesystemet i eksperimentene tilstrekkelig nær hologrammet, må alle rekonstruerte bilder unntatt det ene for $m = 1$, ligge så nær hologrammet at de blir fullstendig defokuserte i den avstand fra hologrammet der det ønskede bildet befinner seg.

Imidlertid viste eksperimentene at det er mulig å fokusere ett ordens bilde om gangen. Hvis vi derfor fastlegger m . orden i posisjonen (x'_0, y'_0, z'_0) , kan vi ganske enkelt finne de tilsvarende verdiene for (x'_c, y'_c, z'_c) slik at ligningene (32), (33) og (34) er tilfredsstillt, hvorved alle de andre bildene blir fullstendig defokuserte og ute av syne i den avstand fra hologrammet hvor det ønskede bildet befinner seg, fordi de skulle vært lokalisert svært nær hologrammet.

Analysen indikerer at de bilder som svarer til andre ordener enn den ene som er ønsket, tvinges til posisjoner nær hologrammet så lenge den paraksiale approksimasjon er gyldig. Den paraksiale approksimasjonen er imidlertid ikke gyldig nær hologrammet. Følgelig kan vi ikke vente veldefinerte bildepunkter nær hologrammet. Dessuten gjelder metodene for nedtegnelse av hologrampunktene, for objektpunkter som ligger i rimelig stor avstand fra hologrammet, og fungerer ikke nær hologrammet. Dette resonnementet leder til den konklusjon at bruk av sfærisk referanse/rekonstruksjonsbølge med fokuspunkt tilstrekkelig nær hologrammet, tvinger alle

de forskjellige ordens bilder, med unntak av det ønskede, til å befinne seg nær inntil hologrammet hvor de slokkes.

Disse argumentene understøttes ved betraktning av hva som skjer når $z'_c \rightarrow \infty$ i ligningene (32), (33) og (34), med andre ord når en plan bølge brukes for rekonstruksjon. Ved igjen å anta at $z_0 \gg z_c$ og at $\lambda = \lambda'$, fås

$$z'_0 \approx \frac{z_c}{m} \quad (38)$$

$$x'_0 \approx \frac{z_c}{z_0} x_0 + x_c \quad (39)$$

$$y'_0 \approx \frac{z_c}{z_0} y_0 + y_c \quad (40)$$

Disse ligningene indikerer at bildene må fokuseres nær hologrammet. Ethvert fravær av bilder tyder på at de ikke kunne bli dannet på grunn av at nedtegningsteknikken ikke virker ved så små avstander til hologrammet.

Videre er det interessant å se ved hjelp av ligningene hva som skjer med posisjonene til høyere ordens bilder når z_c blir mindre. Fra ligning (32) finner vi ved like bølgelengder at

$$z'_0 \approx \frac{z_c z'_c}{m z'_c - z_c} \quad (41)$$

Når derfor m øker, nærmer z'_0 seg z_c/m . Dette betyr at det blir vanskeligere å observere høyere ordens bilder når hologrammet fremstilles nærmere kulebølgens fokuspunkt. Ligning (41) bekrefter resultatene fra eksperimentene med flytting av fokuspunktet, noe som tilsvarer variasjon av z'_0 . Dessuten bekrefter denne ligningen at fokalavstanden z'_0 lett kan justeres ved å variere fokuspunktets posisjon.

I det følgende skal vises at oppfinnelsen er egnet ved alle

nedtegningsteknikker, og ikke bare for den ovenfor angitte. Hvis det syntetiske objektet betraktes som en samling av N punktkilder, vil kombinasjonen av objektbølger og en sfærisk referansebølge være gitt ved

$$U(x_i, y_i) = \sum_{l=1}^N A_l e^{jk(r_{li} + r_{ci})} \quad (42)$$

En gitt nedtegningsteknikk må spesifisere hva hver $r_{li} + r_{ci}$ bør være. For eksempel:

$$r_{li} + r_{ci} = n\lambda + s_{li} \quad (43)$$

hvor n er et helt tall. Deretter forsøker man å finne nye verdier r'_{li} og r'_{ci} forutsatt at s_{li} forblir den samme del av bølgelengden, og n blir erstattet av nm hvor m er et annet helt tall. I det generelle tilfellet er dette alltid mulig for $m = \pm 1$.

En toleransefaktor rundt s_{li} på $\pm\lambda/4$ kan tolereres uten at dette forandrer på analysen. Derfor skulle konklusjonene fra utførelses-eksemplet ifølge ligning (6) også være gyldige i det generelle tilfellet når $m = \pm 1$. Imidlertid kan noen teknikker ha tilbøyeligheter til feil forårsaket av hologrampunktene utstrekning og unøyaktigheter ved deres plassering på grunn av nevnte toleransefaktor.

På grunn av tidsaspektet ved beregning av den samlede bølgefronten er man ofte nødt til å bruke den hurtige fouriertransformasjonen (FFT). Dette betyr at objektet er periodisk med en periode lik det området som er bestemt for objektet. Siden både det reelle og virtuelle bildet har sine høyere ordens bilder, blir det heller brydende å eliminere problemet med ikke overlappende bilder. Ved foreliggende oppfinnelse, som uten videre resulterer i bare ett synlig bilde om gangen, omgås dette problemet. I denne forbindelse skal imidlertid bemerkes at bare halvparten av bildene kan fjernes ifølge foreliggende oppfinnelse, fordi FFT forårsaker periodisitet ved objektet.

I fysisk holografi er det reelle og virtuelle bildet forårsaket av 3. og 4. ledd i ligning (2). Om vi velger at U_s skal være U_r , blir bølgen U uforandret, mens valg av U_s lik U_r^* gjør bølgen U^* uforandret. Hvis U_r og U_s er sfæriske bølger gitt ved $e^{jkr_{ci}/r_{ci}}$ eller $e^{-jkr_{ci}/r_{ci}}$ ved hologrammet, og hvis vi antar at objektbølgen er dannet av punktbilder hver i avstander r_{li} fra tilhørende hologrampunkter, vil det modifiserte bildet U_M være gitt ved

$$U_M = \sum_{\ell} A_{\ell} e^{jk(r_{li} \pm 2r_{ci})} \quad (44)$$

Ligningene (32), (33) og (34) for $m = -1$ er gyldige også her. Så selv om nedtegningsteknikkene kan være forskjellige, blir sluttresultatene de samme i begge typer holografi for 1. ordens bilder. Den slukkeeffekten som her er diskutert i forbindelse med syntetisk holografi, og som er forårsaket av hologrampunktens størrelse, kan derfor også introduseres i fysisk holografi hvis et passende materiale blir brukt som interferensmønsterbærer.

P a t e n t k r a v:

1. Fremgangsmåte for fremstilling av et hologram av en objektbølgefront og rekonstruksjon av denne ved hjelp av en sfærisk referanse/rekonstruksjonsbølge, k a r a k t e r i s e r t ved at referanse/rekonstruksjonsbølgens kilde plasseres i liten avstand fra hologrammet, og at denne avstand justeres under rekonstruksjonen, hvorved bare én rekonstruert avbildning fokuseres med nevnte kilde i en gitt posisjon mens øvrige avbildninger samtidig defokuseres, idet nevnte avstand bestemmes på basis av det signal/støy-forhold som er ønsket i den fokuserte avbildningens posisjon, samt geometriske størrelser som i og for seg er kjent å føre til defokusering, så som størrelsen av hologrammet, avstand mellom hologrammet og objektet, og utstrekningen av hologrampunktene.
2. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t ved at avstanden forandres under rekonstruksjonen inntil den nevnte fokuserte avbildningen bringes ut av fokus og en annen avbildning fokuseres.
3. Fremgangsmåte som angitt i krav 2, k a r a k t e r i s e r t ved at avbildningene er av forskjellig orden.
4. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t ved at avstanden forandres under rekonstruksjonen for på i og for seg kjent måte å variere avbildningens størrelse.

142016

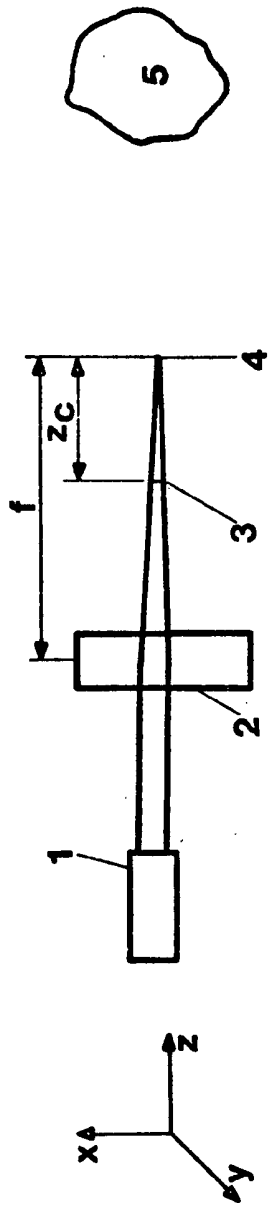


Fig. 1

142016



Fig.2



Fig.3

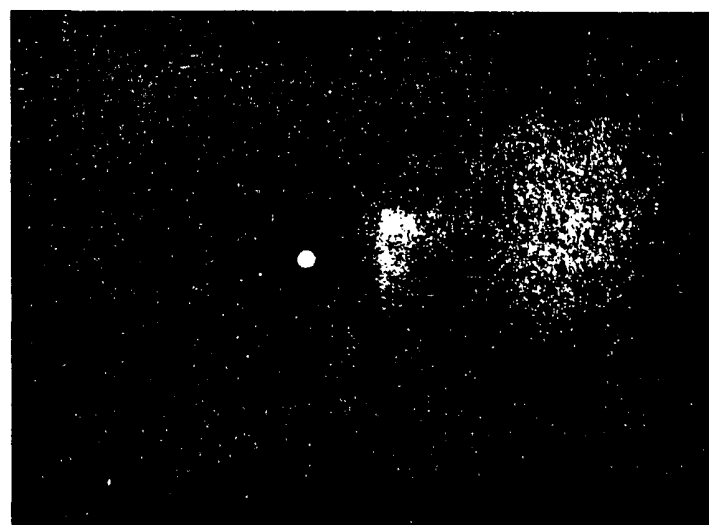


Fig.4

142016



Fig.5

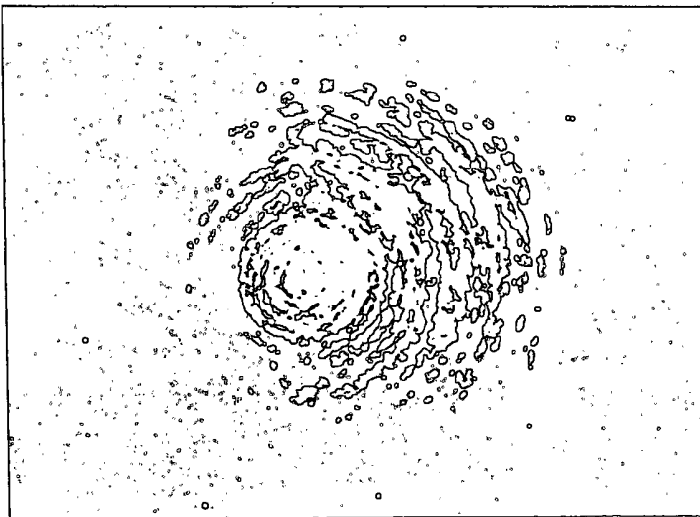


Fig.6

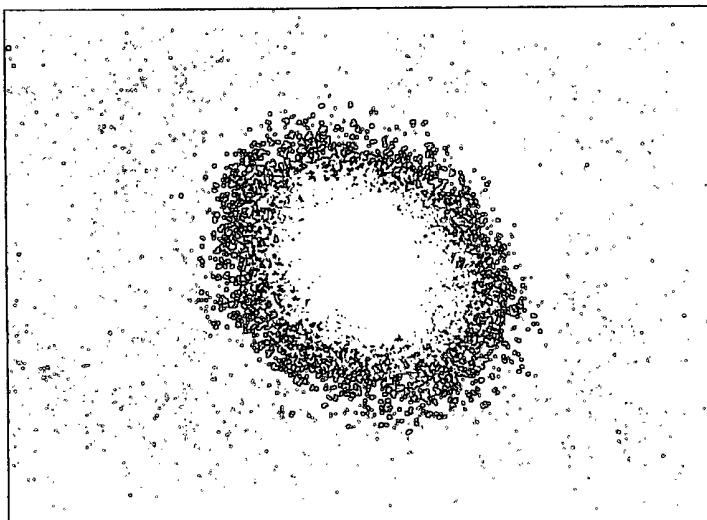


Fig.7

142016

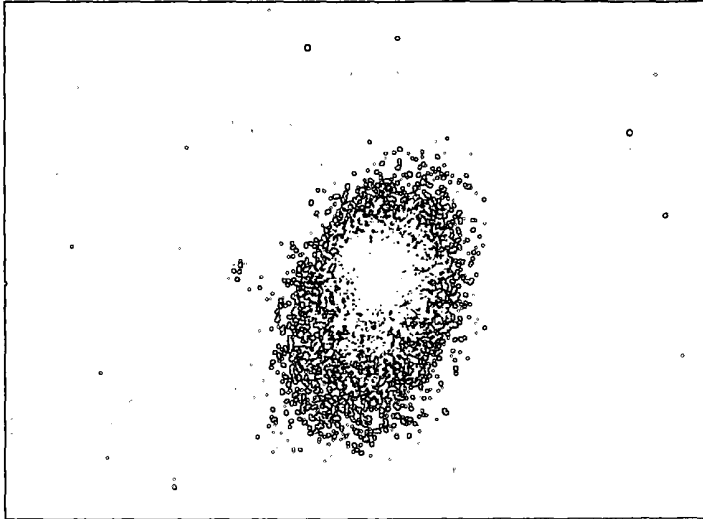


Fig.8



Fig.9

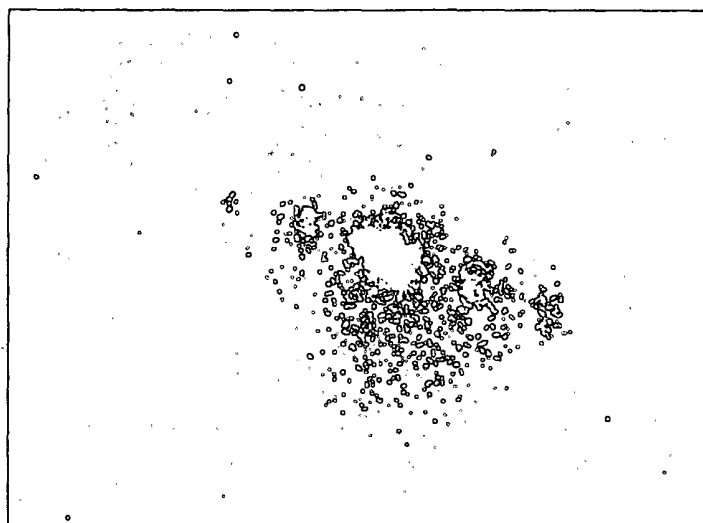


Fig.10

142016

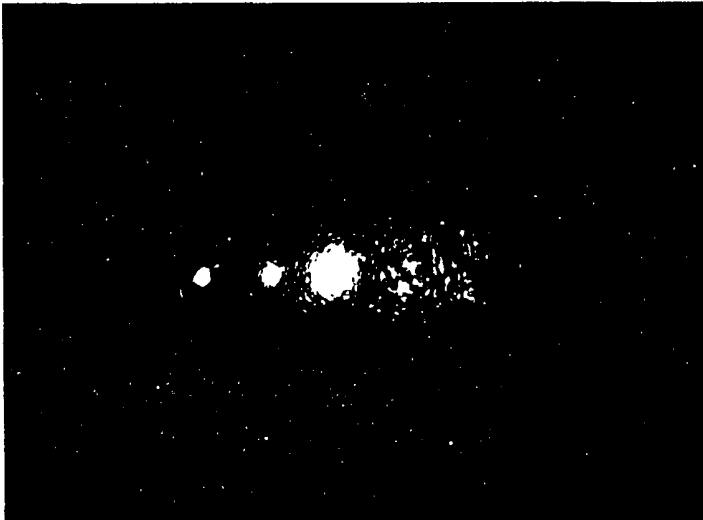


Fig.11



Fig.12



Fig.13

142016

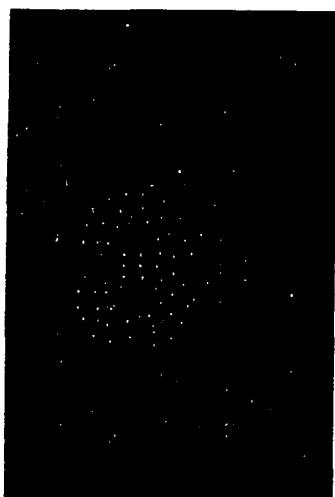


Fig.14

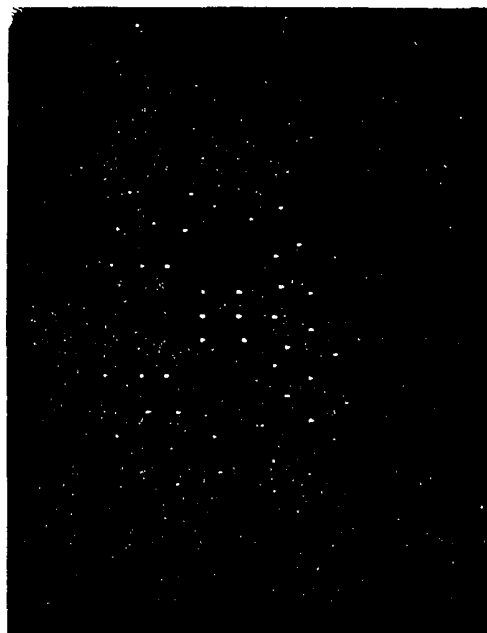


Fig.15