

INNEHÅLL

INLEDNING	s. 2
SAMMANFATTNING	s. 2
HOLOGRAFISK TEORI	s. 3
HOLOGRAFISK INTERFEROMETRI	s. 5
UNDERSÖKNING AV SVÄNGNINGSMÖNSTER PÅ HORNHINNA	s. 6
• APPARATUR	s. 6
• FÖRUNDERSÖKNING	s. 7
• UNDERSÖKNING AV GRISÖGON	s. 9
• UNDERSÖKNING AV MÄNNISKOÖGON	s. 15
TILL MINA MEDHJÄLPARE	s. 21

Omslagets bild visar en del av försöksuppställningen:
den högtalardrivna plasttappen vilande på ögat samt
hållaren för hologramplåten.

INLEDNING

Avsikten med detta arbete var att försöka göra hologram på ögats hornhinna, ett ganska svårt objekt, eftersom den är genomskinlig, mjuk och kan avge vätska och därmed krympa. Om det trots allt gick, var målet att kartlägga det svängningsmönster som uppstår, då man tvingar hornhinnan att vibrera. Av speciellt intresse var att utreda om svängningen är lokal eller utbredd över hela hornhinnan. Vid mätning av tryck i ögat vibreras hornhinnan med en liten tapp och tappens intryckning av hornhinnan har visats vara omvänt proportionell mot trycket [C.E.T. Krakau: A vibration tonometer. *Ophtal.Res.* 1: 129-130 (1970)].

Hologram har tidigare gjorts på ögats näthinna [Ohzu, H.: *Holographic ophthalmometry. Holography in medicine.* Pal Greguss (ed). IPC Science and Technology Press Limited, 1975].

Holografisk teori behandlas utförligt i Collier, Burckhardt, Lin: *Optical holography.* Academic press, 1971.

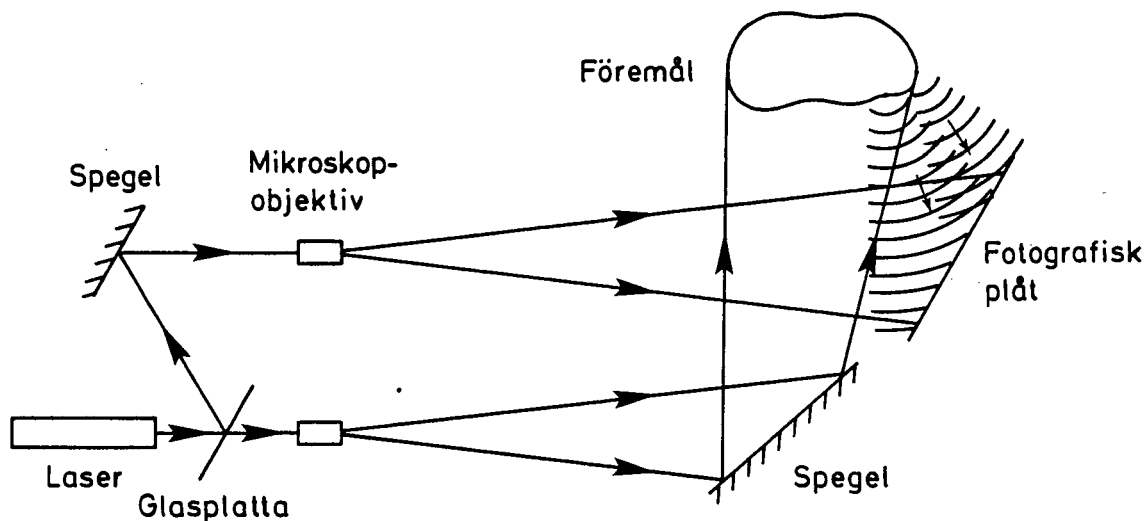
SAMMANFATTNING

Undersökningen av hornhinnan inleddes med tidsmedelvärdeshologram av grisögon. Dessa visar, att det finns en viss asymmetri i ögat. Vid små svängningsamplituder är rörelsen begränsad till ett litet område och vid större amplituder är rörelsen mera utbredd. Vid konstant amplitud blir svängningen mera utbredd ju högre trycket i ögat är. Undersökning av människoögon har givit mer svårtydda resultat. Hornhinnan har delats upp i flera svängande områden. Det svängande områdets storlek är inte så beroende av amplituden som fallet är för grisögon. Svängningsmönstret varierar inte heller systematiskt med trycket i ögat.

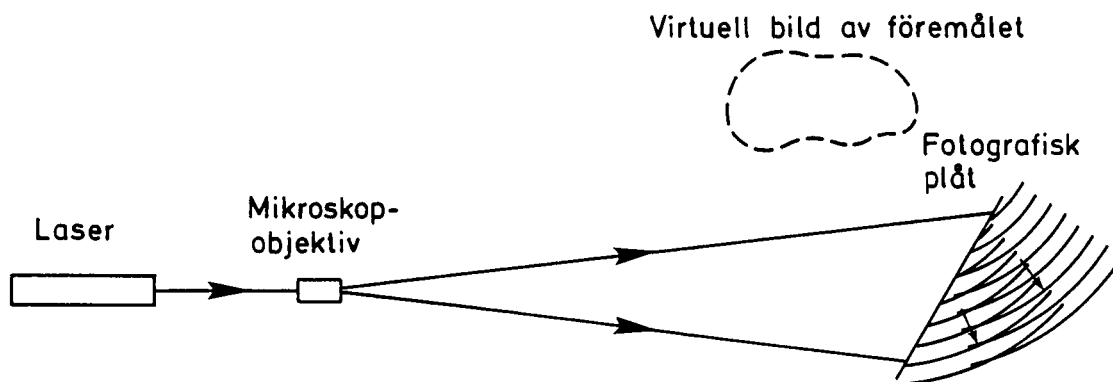
För att kunna dra säkrare slutsatser beträffande hornhinnan på människoögon behövs fler experiment, t.ex. på svängningsmönstrets frekvensberoende. Säkrare resultat hade man också fått om man hade använt stroboskopisk belysning, dvs. belyst hornhinnan endast i ytterlägena av svängningen. Genom att använda en laser med kortare våglängd, t.ex. HeCd, hade man fått ett tätare fransmönster på hornhinnan. Dessa undersökningar får tyvärr inte plats inom detta arbete.

HOLOGRAFISK TEORI

Ett hologram är en tredimensionell avbildning av ett föremål. Hologrammet fås om man låter en högupplösande fotografisk emulsion belysas dels av föremålet, dels av ett referensknippe, som är fasmässigt kopplat till ljuset från föremålet (figur nedan).



Den fasmässiga kopplingen förutsätter, att man använder koherent ljus, laserljus. De två ljusknippena interfererar på den fotografiska plåten och efter framkallning och fixering uppträder interferensmönstret som innehåller information om de ursprungliga ljusvågorna. Mönstret är dock för tätt för att kunna urskiljas med blotta ögat. Den tredimensionella bilden uppstår då man låter plåten belysas på samma sätt som referensljuset belyste den (figur nedan).



Det s.k. rekonstruktionsljuset böjs vid passage av interferensmönstret och får därefter det utseende som ljusvågorna från föremålet hade.

För att beskriva detta matematiskt kan man låta en ljusvåg representeras av en komplex vektor (egentligen av realdelen av vektorn). Objektvågen kallas $\bar{A} = \bar{a}(x, y) \cdot \exp(i(2\pi ft + \varphi_a(x, y)))$. Eftersom vi bara är intresserade av tidsmedelvärden kan vi utesluta den tidsberoende faktorn och skriva $\bar{A} = \bar{a}(x, y) \cdot \exp(i\varphi_a(x, y))$, där x och y är koordinater på hologramplåten. På samma sätt kallas referensvågen $\bar{R} = \bar{r}(x, y) \cdot \exp(i\varphi_r(x, y))$.

Intensiteten på plåten kan då skrivas som

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |\bar{A} + \bar{R}|^2 = (\bar{A} + \bar{R})(\bar{A} + \bar{R})^* = \\ &= \bar{A} \cdot \bar{A}^* + \bar{R} \cdot \bar{R}^* + \bar{A}^* \cdot \bar{R} + \bar{A} \cdot \bar{R}^* = \\ &= I_a(x, y) + I_r(x, y) + 2 \bar{a} \cdot \bar{r} \cdot \\ &\quad \cdot \cos [\varphi_r(x, y) - \varphi_a(x, y)]. \end{aligned}$$

Den sista termen anger fasvinkeln mellan referens- och objektljus. Det är denna s.k. interferensterm som ger upphov till den tredimensionella bilden. För att vi skall få någon interferensterm krävs, att \bar{a} har någon komponent parallell med \bar{r} , dvs. två vinkelrätt polariserade vågor duger inte.

Termen $I_a(x, y)$ innehåller interferens mellan olika objektpunkter, men den kan göras liten i förhållande till interferenstermen. Termen $I_r(x, y)$ ger ett jämnt bakgrundsljus. En plåt som har belysts med intensiteten $I(x, y)$ och framkallats får amplitudtransmissionen

$$t(x, y) = t_0 - t_E(x, y) = t_0 - k \cdot I(x, y)$$

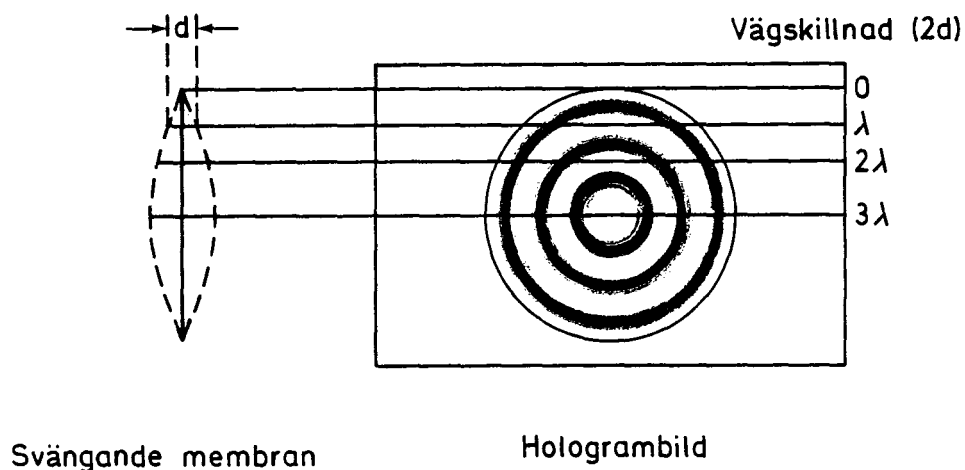
där t_0 är amplitudtransmissionen före exponering och t_E är amplitudtransmissionen efter exponering. Om vi sedan belyser plåten med rekonstruktionsvågen (dvs. referensvågen) fås efter passage av plåten

$$\begin{aligned} \bar{R}(t_0 - k \cdot I(x, y)) &= \bar{R} \cdot t_0 - k \cdot \bar{R} \cdot I(x, y) \text{ där} \\ &- k \cdot \bar{R} \cdot I(x, y) = \\ &- k [\bar{R} \cdot (I_r + I_a) + \bar{R} \cdot \bar{A}^* \cdot \bar{R} + \bar{R} \cdot \bar{A} \cdot \bar{R}^*] = \\ &= - k [\bar{R} \cdot (I_r + I_a) + \bar{R} \cdot \bar{R} \cdot \bar{A}^* + I_r \cdot \bar{A}]. \end{aligned}$$

Termen $- k \cdot I_r \cdot \bar{A}$ är en kopia av den ursprungliga vågen \bar{A} . Minustecknet anger att den är fasförskjutet $-\pi$. Amplituden beror på k och I_r .

HOLOGRAFISK INTERFEROMETRI

Om man vill studera en förändring, (som är av storleksordningen ljusvåglängder), av ett föremål kan detta göras genom holografisk interferometri på olika sätt, t.ex. dubbelexponering, tidsmedelvärdehologram och realtidshologram. Vid dubbelexponering stör man föremålet på något sätt mellan två exponeringar på samma plåt. Det uppstår då interferens mellan föremålets två lägen och interferensmönstret (omväxlande ljusa och mörka linjer) överlagras på den tredimensionella bilden. Ett tidsmedelvärdehologram fås om föremålet får svänga regelbundet under hela exponeringstiden. Interferensen uppstår till största delen mellan svängningens båda ytterlägen, eftersom föremålet befinner sig längst tid i dessa. En ljusvåg reflekteras mot en punkt på föremålet i dess ena ytterläge och en annan ljusvåg mot samma punkt i andra ytterläget. Om vägskillnaden mellan dessa vågor är ett helt antal våglängder, blir det ljust (förstärkning) men om den i stället är ett udda antal halva våglängder, blir det mörkt (utsläckning), (figur nedan).



Mönstret kan sägas bestå av iso-amplitudlinjer och ger en bild av hela svängningsmönstret. Med andra metoder kan man bara mäta amplituden punktvis. Med realtidshologram kan man direkt studera hur en störning påverkar föremålet. Man gör först ett vanligt hologram som man placerar i exakt samma position som vid upptagningen. Föremålet ligger också kvar i ursprungligt läge. Då uppstår interferens mellan det verkliga föremålet och den holografiska bilden av det. Om man nu stör föremålet ser man hur interferensmönstret växer fram och får alltså en uppfattning om hur förändringen sker.

UNDERSÖKNING AV SVÄNGNINGSMÖNSTER PÅ HORNHINNA

Apparatur:

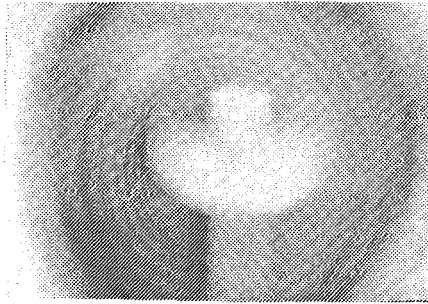
Den holografiska uppställningen visas nedan.



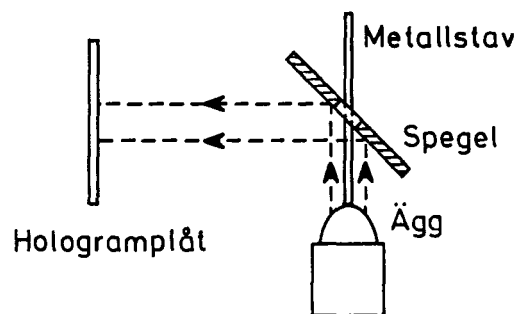
En laserstråle (He-Ne: 6328 Å) delas upp i objektstråle, som får belysa den fotografiska plåten via objektet, och referensstråle som får belysa plåten direkt. Eftersom dessa två strålar är fasmässigt kopplade till varandra bildas på plåten ett interferensmönster med ca 1500 linjer/mm (ljus där strålarna är i fas och mörker, där de är i motfas). Efter framkallning placeras plåten i referensstrålens väg på samma sätt som vid upptagningen. När detta ljus böjs av interferensmönstret på plåten rekonstrueras ljuset från objektet och man får en avbildning med objektets alla tredimensionella egenskaper. Om man låter objektet utföra regelbundna svängningar under upptagningen av hologrammet får man, överlagrat på den tredimensionella bilden, ett synligt linjemönster som uppstår genom interferens mellan det svängande objektets båda ytterlägen.

Förundersökning:

För att få fram en lämplig försöksuppställning gjordes en del undersökningar på mjuka, halvgenomskinliga material såsom hårdkokt ägg, tomat och gummiboll. Figur nedan visar dubbelexponering av hårdkokt, skalat ägg utan och med 50 g belastning.



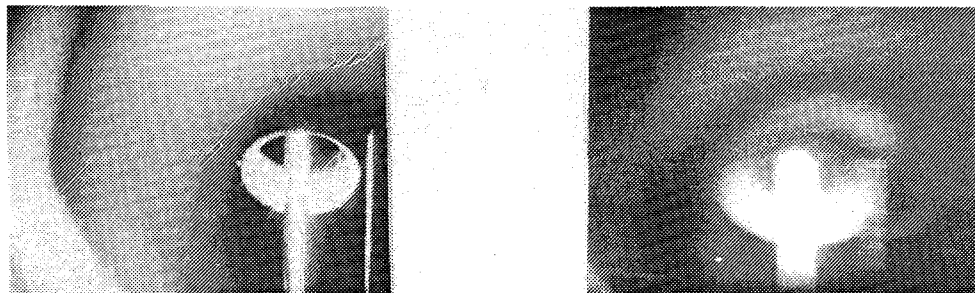
Det cirkulära fransmönstret visar att deformationen har skett symmetriskt och är utbredd över hela den synliga ytan. Den ljusa fläcken i mitten är en reflex från kanten av ett hål i spegeln. Genom detta hål löpte metallstaven som användes för att deformera ägget i en provisorisk försöksuppställning (figur nedan).



Figur nedan visar dubbelexponeringar av tomat utan och med 2 g resp. 5 g belastning.

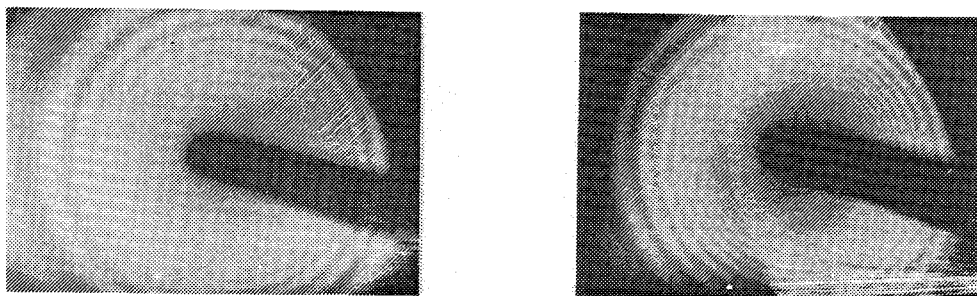


Mönstret är inte så symmetriskt som för ägget men en tomat är ju ganska inhomogen med de mjuka kärnsamlingarna mellan de fastare skiljeväggarna. Deformationen sker bara i ett begränsat område. Den större belastningen ger som väntat fler fransar, dvs. större deformation. Figur nedan visar tidsmedelvärdeshologram av tomat.



Metallstaven vibrerades av ett högtalarmembran som drevs av en tongenerator. Svängningsfrekvensen var 15 Hz och amplituden störst för högra bilden vilken som väntat uppvisar flest fransar.

Figur nedan visar tidsmedelvärdeshologram av en gummiboll.



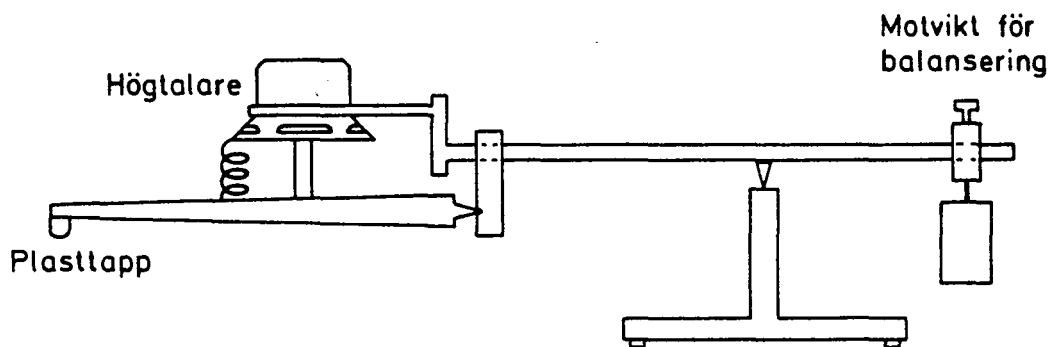
Här har bollen vibrerats av en plasttapp (se figur s.9). Svängningsfrekvensen var 14 Hz och amplituden störst för högra bilden. Bollen uppvisar ett mycket symmetriskt svängningsmönster.

Undersökning av grisögon:

Först gjordes hologram på grisögon för att kontrollera, om det gick att holografera hornhinnan. Hornhinnan är genomskinlig och släpper igenom mycket av det ljus som måste reflekteras mot plåten för att ge en bild. Ögat är ganska mjukt och instabilt och det finns dessutom risk för att det krymper under exponeringen på grund av vätskeavdunstning. Man får då en okontrollerad rörelse, som adderas till hornhinnans vibration.

Förberedelser:

En kanyl, kopplad till en öppen behållare med fysiologisk koksaltlösning, fördes in i glaskroppen genom synnerven. Trycket i ögat kunde sedan regleras genom att behållaren höjdes eller sänktes. På hornhinnan lades ett tunt lager aluminiumpuder för att få en bättre reflekterande yta. Ögat placerades i en hållare med hornhinnan uppåt. Hornhinnan vibrerades av en plasttapp, som drevs av ett högtalar-membran, kopplat till en våggenerator som alstrade sinusvängningar (figur nedan).



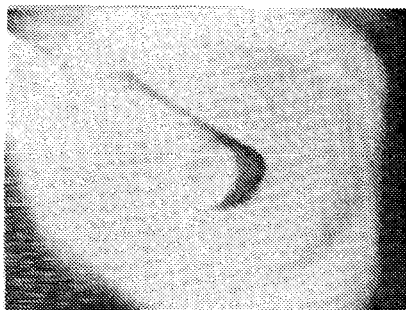
Utförande:

Först gjordes en vanlig exponering med ögat i vila, för att kontrollera stabiliteten. Därefter gjordes en serie med varierande signalamplitud med vibrationsfrekvens på 14 Hz. Vidare gjordes en serie med varierande frekvens vid konstant signalamplitud. Vid dessa försök nådde normaltryck i ögat, 25 mm Hg. Slutligen gjordes en serie med varierande tryck i ögat varvid signalamplitud och frekvens hölls konstanta.

Hologrammen upptogs på Agfa-Scientia 10E75-plåtar. Exponeringstiden var 1 s. Vid avfotograferandet av hologrammen var det svårt att fokusera ögat och fransar samtidigt, eftersom fransarna inte är lokaliserade på ögat utan ligger någonstans i rymden utanför ögat.

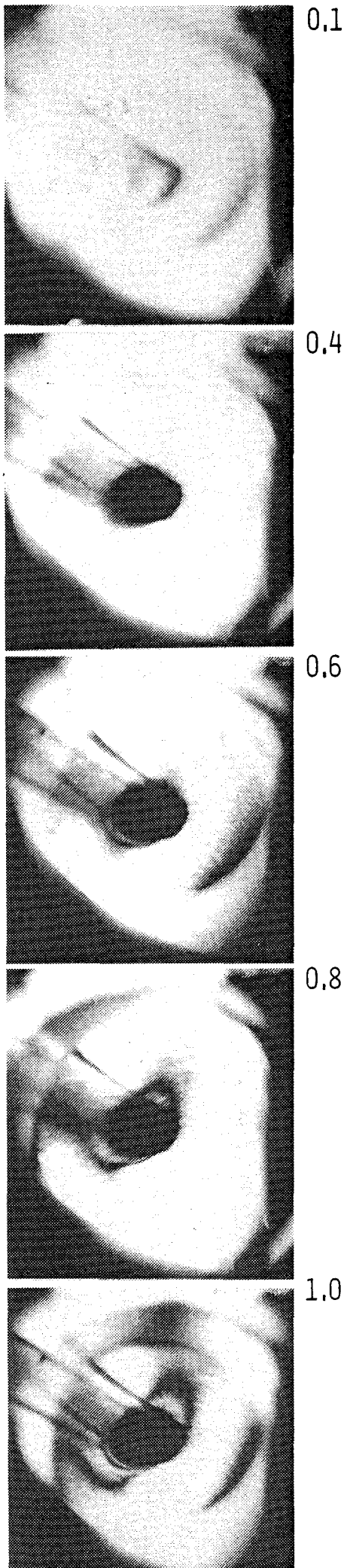
Resultat:

Den vanliga exponeringen (figur nedan) visar, att ögat har legat stabilt och inte krympt.



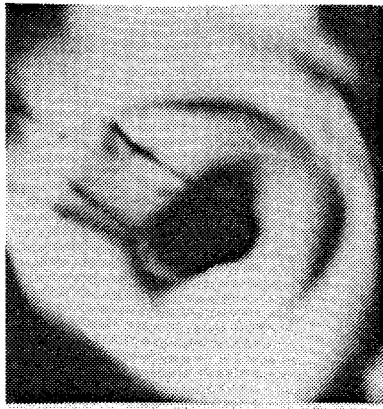
Serien med olika signalamplituder (figur 1) visar, att svängningen vid låg signalamplitud endast sker i ett mycket litet område under och kring plasttappen och att vid ökande signal en större del av hornhinnan svänger. Vid höga signalamplituder uppträder fransar inte bara på hornhinnan utan även på resten av ögongloben. Till en början består isoamplitudlinjerna av ovaler symmetriskt kring tappen. Områdena utanför ovalens långsidor är mycket ljusa, vilket tyder på att här inte skett någon rörelse. Vid högre amplituder svänger hela hornhinnan på ett oregelbundet sätt, eventuellt har hela ögat vridit sig i hållaren.

Serien med olika frekvenser (figur 2) visar, att frekvensen inte nämnvärt inverkar på svängningsmönstret. Första bilden visar effekten av att ögat har legat instabilt. Serien med olika tryck i ögat (figur 3) visar, att när trycket ökar blir hornhinnan styvare och större del av den svänger. Det lilla området nedanför tappen, som svänger vid lägre tryck, upphör att svänga, när trycket ökar.

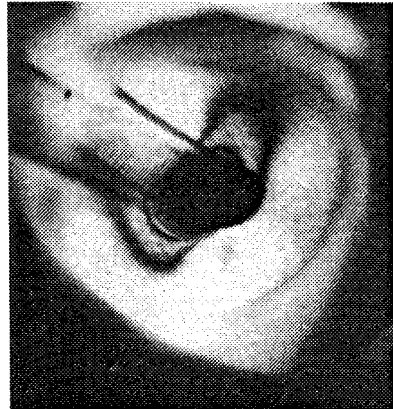


FIGUR 1

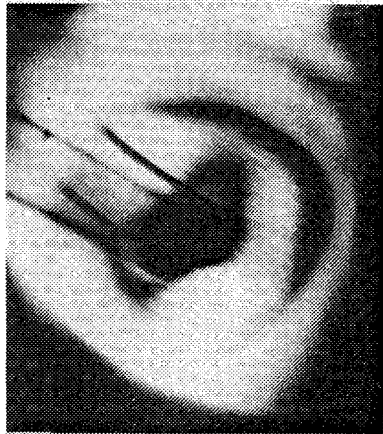
HOLOGRAMREKONSTRUKTION AV SVÄNGANDE
HORNHINNA PÅ GRISÖGA VID OLIKA
SIGNALAMPLITUDER (RELATIVA VÄRDEN).



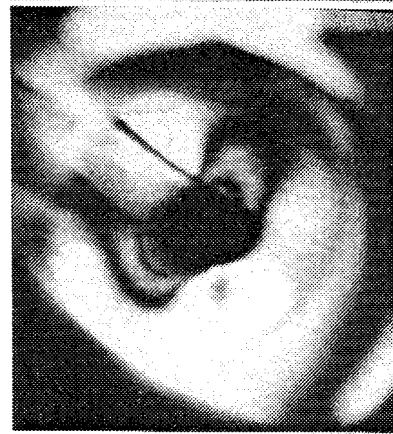
1.2



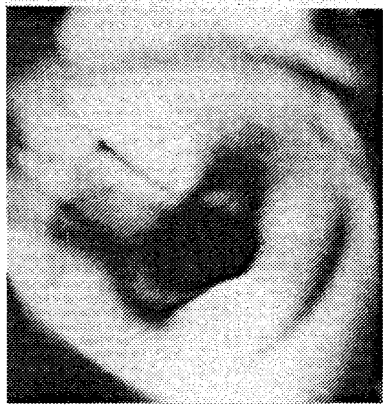
2.2



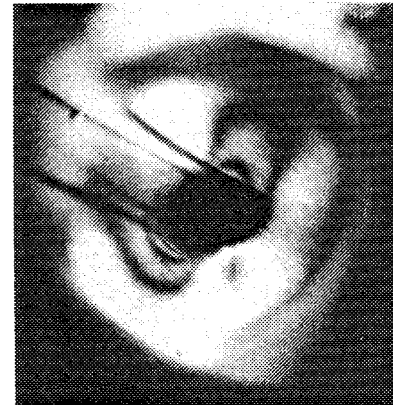
1.4



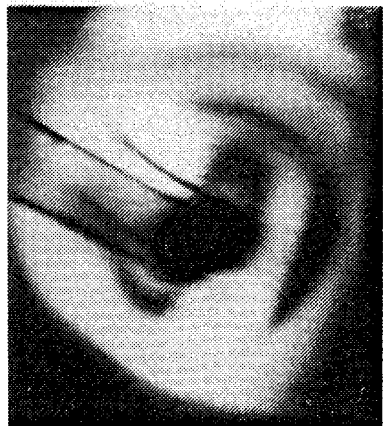
2.4



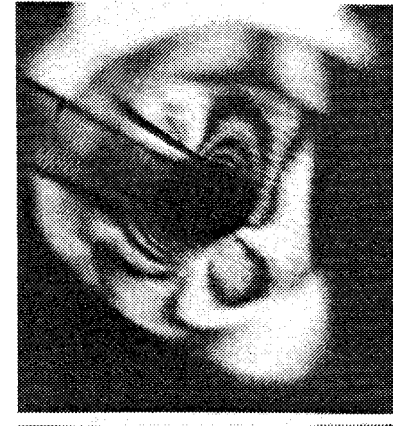
1.6



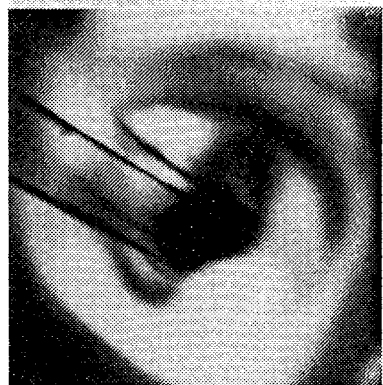
2.6



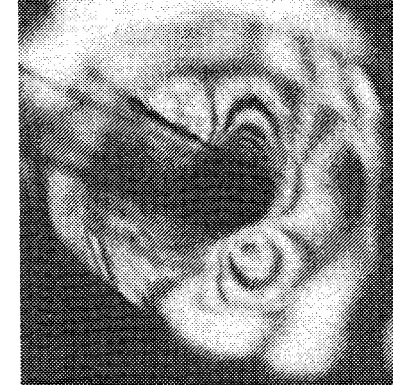
1.8



3.0

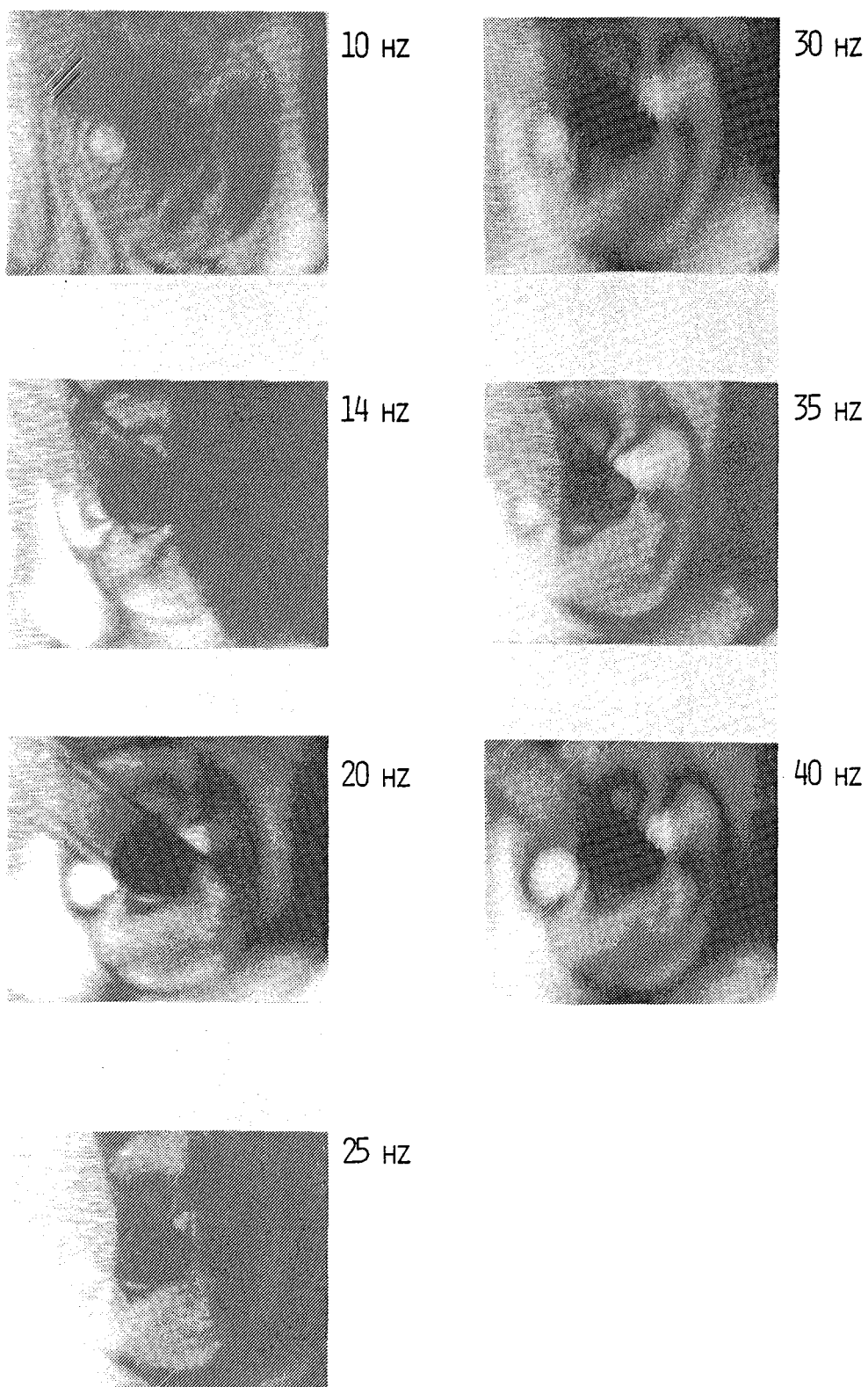


2.0



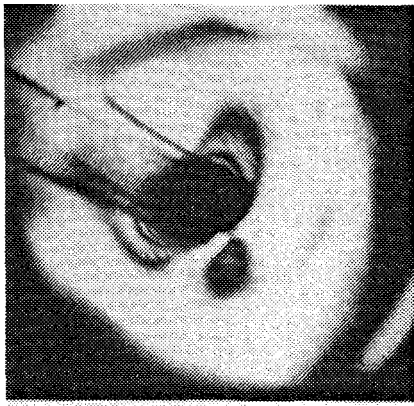
4.0

FIGUR 1
FORTS.

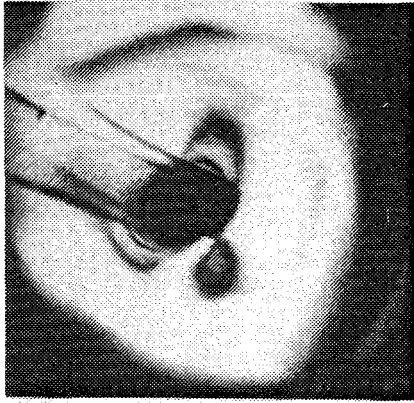


FIGUR 2

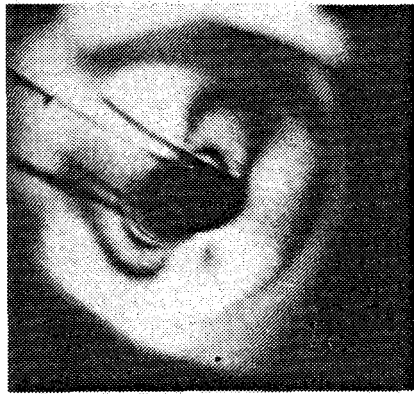
HOLOGRAMREKONSTRUKTION AV SVÄNGANDE
HORNHINNA PÅ GRISÖGA VID OLIKA
FREKVENSER (RELATIV SIGNALAMPLITUD 2,0).



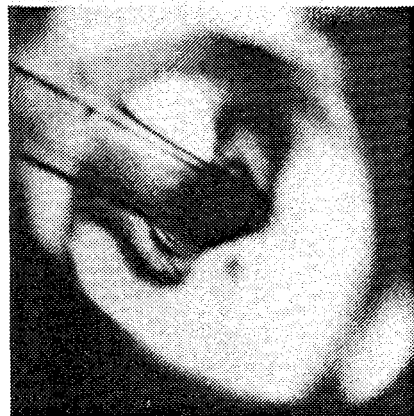
18 MM HG



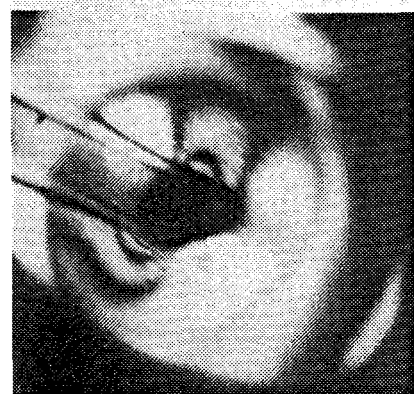
22 MM HG



26 MM HG



30 MM HG



33 MM HG

FIGUR 3

HOLOGRAMREKONSTRUKTION AV SVÄNGANDE
HORNHINNA PÅ GRISÖGA VID OLIKA TRYCK
I ÖGAT (RELATIV SIGNALAMPLITUD 2,6).

Undersökning av människoögon

Förberedelser:

Ögonen erhöles 12-48 timmar "post mortem" och undersökningarna utfördes samma dag. Ögonen preparerades på samma sätt som grisögonen. Tappen vilade på hornhinnan med en belastning av 0,5 g.

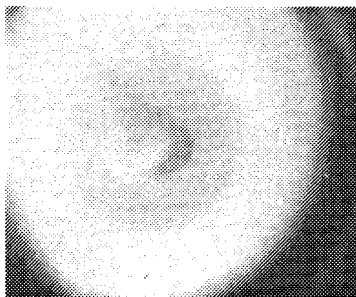
Utförande:

Dubbelexponering utan förändring gjordes som stabilitetskontroll. Dessutom gjordes en dubbelexponering, vid vilken en belastning på 0,5 g lagts på tappen, som dessförinnan balanserade på rakblad på ställningen och bara precis var i kontakt med hornhinnan.

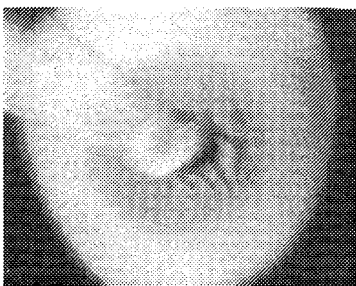
Serier upptogs med varierande signalamplitud vid normalt tryck och med varierande tryck vid konstant signalamplitud. Vibrationsfrekvensen var 14 Hz. Hologrammen upptogs på Agfa-Scientia 10E75-plåtar. Exponeringstiden var 1 s.

Resultat:

Dubbelexponeringen med 1 s paus visar, att ögat inte rört sig (figur nedan).

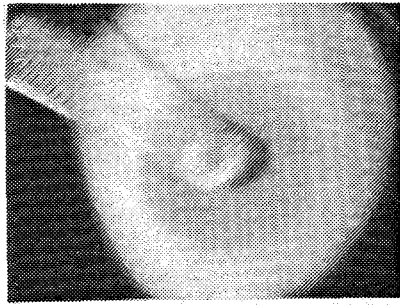


Dubbelexponeringen, då belastningen lades på, visar att en deformation ägt rum (figur nedan).

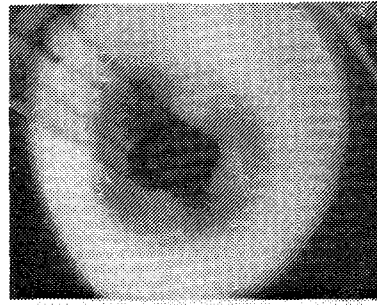


Serien med olika signalamplituder (figur 4) visar, att hornhinnan tenderar att dela upp sig i fyra svängande områden och glaskroppen utanför hornhinnan i två svängande områden. Mellan figur 4.10 och figur 4.11 har tappen flyttats för att få bättre centrering.

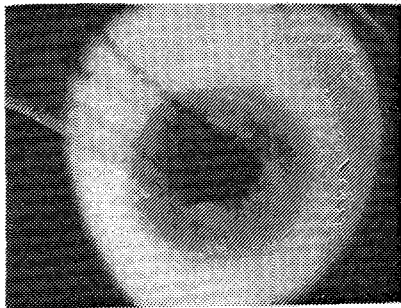
Serien med olika tryck i ögat (figur 5) visar, att vid högre tryck svänger större del av ögat än vid lägre tryck. Vid lägre tryck har hornhinnan delat upp sig i åtta svängande områden.



FIGUR
4.1
0.1



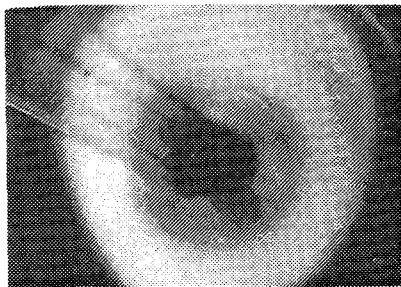
FIGUR
4.4
0.8



FIGUR
4.2
0.4



FIGUR
4.5
1.0



FIGUR
4.3
0.6



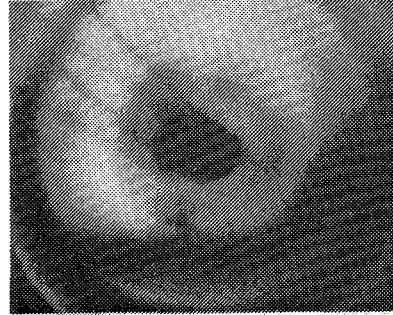
FIGUR
4.6
1.2

FIGUR 4

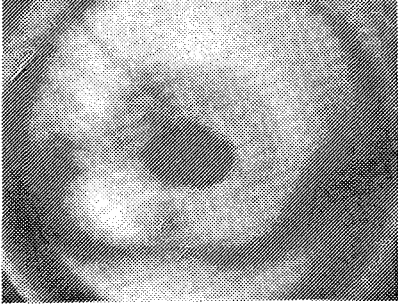
HOLOGRAMREKONSTRUKTION AV SVÄNGANDE
HORNHINNA PÅ MÄNNISKOÖGA VID OLIKA
SIGNALAMPLITUDER (RELATIVA VÄRDEN).



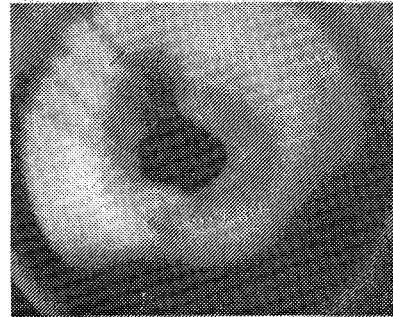
FIGUR
4,7
1.4



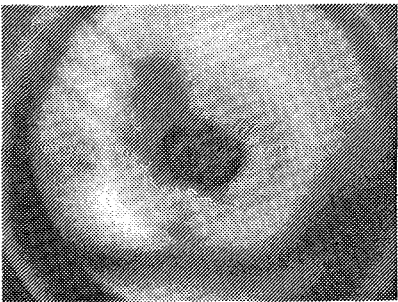
FIGUR
4,11
1.4



FIGUR
4,8
1.6



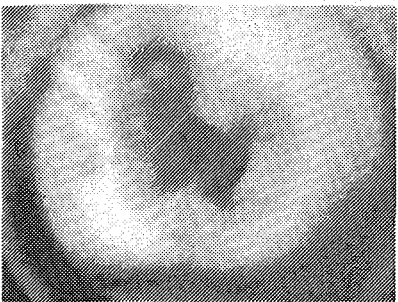
FIGUR
4,12
1.6



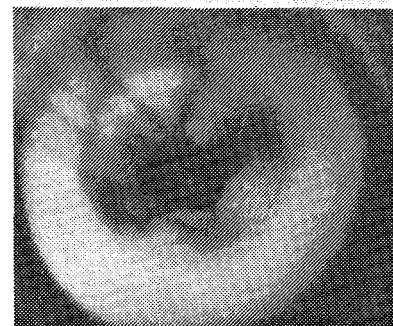
FIGUR
4,9
1.8



FIGUR
4,13
1.8



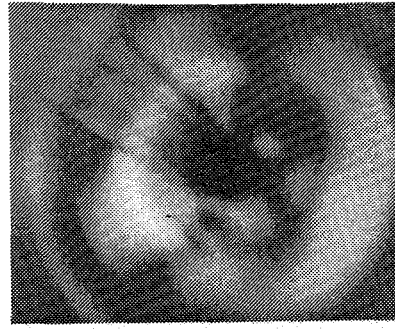
FIGUR
4,10
2.0



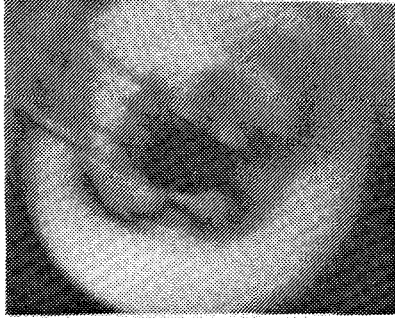
FIGUR
4,14
2.0



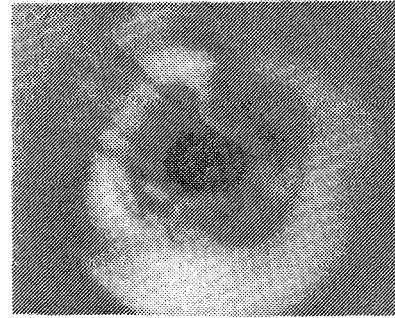
FIGUR
4.15
2.2



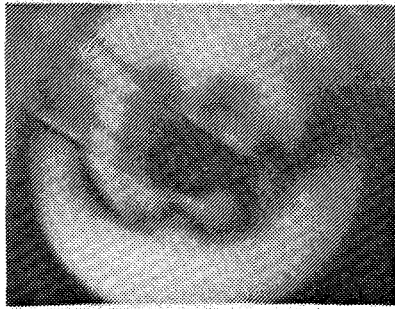
FIGUR
4.20
3.2



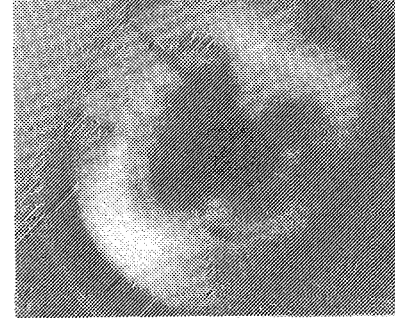
FIGUR
4.16
2.4



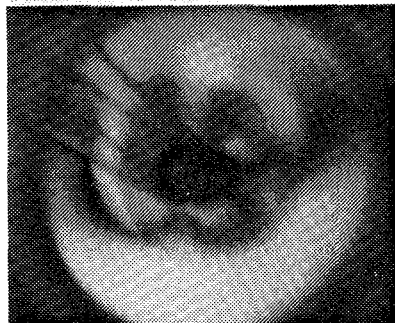
FIGUR
4.21
3.4



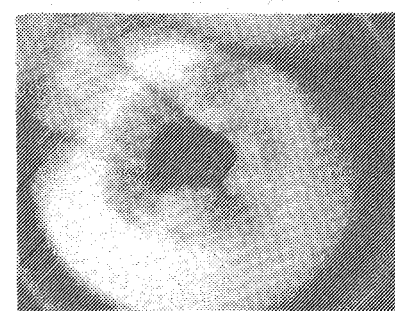
FIGUR
4.17
2.6



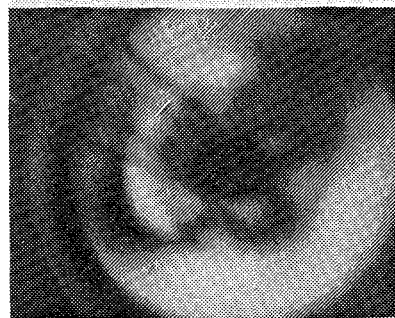
FIGUR
4.22
3.6



FIGUR
4.18
2.8



FIGUR
4.23
3.8

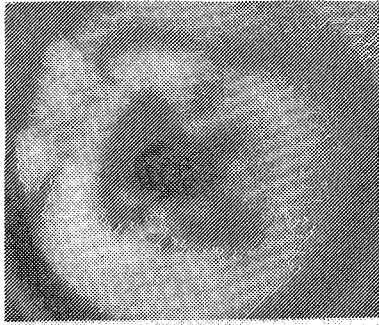


FIGUR
4.19
3.0



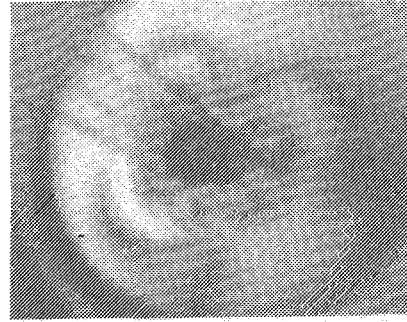
FIGUR
4.24
4.0

FIGUR 4
FORTS.



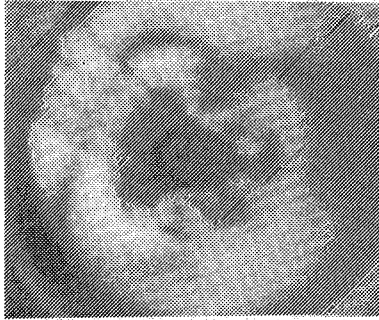
FIGUR
4.25

4.2



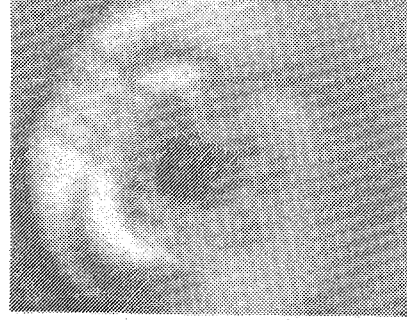
FIGUR
4.30

5.2



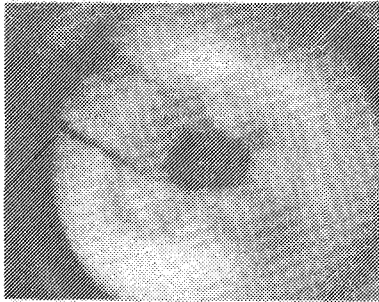
FIGUR
4.26

4.4



FIGUR
4.31

5.4



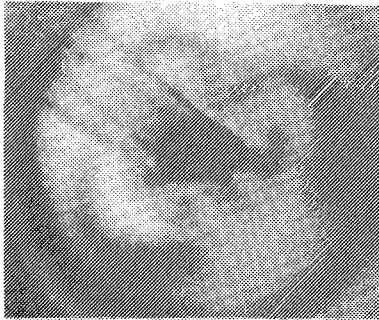
FIGUR
4.27

4.6



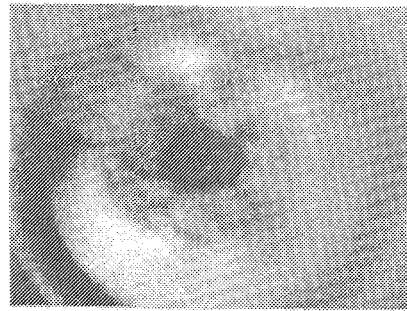
FIGUR
4.32

5.6



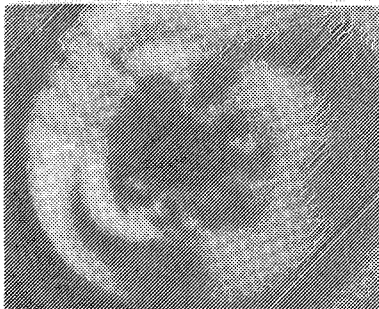
FIGUR
4.28

4.8



FIGUR
4.33

5.8



FIGUR
4.29

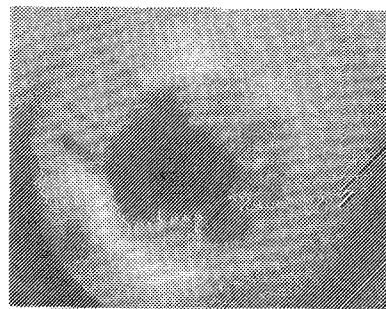
5.0



FIGUR
4.34

6.0

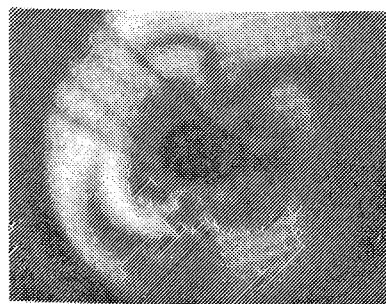
FIGUR 4
FORTS.



18 MM HG



22 MM HG



26 MM HG



30 MM HG



33 MM HG

FIGUR 5

HOLOGRAMREKONSTRUKTION AV SVÄNGANDE
HORNHINNA PÅ MÄNNISKOÖGA VID OLIKA
TRYCK I ÖGAT (RELATIV SIGNALAMPLITUD 5,2).

TILL MINA MEDHJÄLPARE

Jag vill rikta ett varmt tack till min handledare fil. dr. Sven-Göran Pettersson för hans stora intresse och för att han låtit mig ta del av sina ousinliga kunskaper inom holografi. Vidare vill jag tacka följande personer vid fysikinstitutionen för deras hjälp med utskrivning, genomläsning, figurritning, mekaniska och elektriska konstruktioner:

sekreterare Margareta Arnwald
universitetslektor Bodil Jönsson
ingenjör Lennart Nilsson
finmekaniker Jan Olsson
ingenjör Georg Romerius

Jag vill också tacka professor Lennart Minnhagen och professor Sune Svanberg, som gett mig möjligheter att utföra detta arbete.

Ett speciellt tack vill jag rikta till professor C.E.T. Krakau, institutionen för oftalmologi vid Lunds Universitet, för lån av försöksutrustning och för goda råd angående handhavandet av försöksmaterial- och utrustning.

TACK ALLIHOP!