

Iceland  
Liechtenstein  
Norway grants



Programme Operated by:  
**f r s e**  
Foundation for the Development  
of the Education System

# HOLOGRAFIA ARTYSTYCZNA

dr hab. Jarosław Bogucki  
dr inż. Marek Sutkowski  
dr Szymon Zwoliński

Wydawca: Uniwersytet Artystyczny im. Magdaleny Abakanowicz w Poznaniu

Finansowanie: ze Środków Funduszy Norweskich i EOG przez Islandię, Liechtenstein oraz Norwegię

Program: Edukacja EOG/21/K4/W/0070

Autorzy: dr hab. Jarosław Bogucki  
dr inż. Marek Sutkowski  
dr Szymon Zwoliński

Redakcja: Jacek Lang

Tłumaczenie na angielski: Jacek lang

Tłumaczenie na norweski: Sztuczna Inteligencja (Chat GPT)

Fotoedycja i układ: dr hab. Jarosław Bogucki

Poznań 2023

ISBN 978-83-66015-66-1

Projekt „Iluzja formy – o kształtowaniu na uczelniach artystycznych” korzysta z dofinansowania o wartości 197 135 EUR otrzymanego od Islandii, Liechtensteinu i Norwegii w ramach Funduszy EOG. Celem projektu „Iluzja formy” jest opracowanie nowych strategii nauczania, wprowadzenie innowacji oraz wzmacnianie relacji na poziomie szkolnictwa wyższego, pomiędzy instytucjami z Polski i Norwegii.

\*\*\*

The „Illusion of Form” project benefits from a grant of €197 135 from Iceland, Liechtenstein and Norway under the EEA funds. „Illusion of Form” is an activity aimed at developing new teaching strategies, introducing innovations and strengthening relations at the level of higher education between institutions from Poland and Norway.



|   |           |
|---|-----------|
| <b>WERSJA POLSKA</b>  | <b>5</b>  |
| <b>HOLOGRAFIA</b>   | <b>6</b>  |
| 1. Czym jest holografia   | 6         |
| 2. Czy widziałeś hologram?  | 6         |
| 3. Holografia obrazowa w życiu codziennym artysty   | 11        |
| 4. Powstanie i rozwój holografii  | 13        |
| 5. Zasada zapisu holograficznego  | 16        |
| 6. Zasada rekonstrukcji holograficznej  | 18        |
| 7. Wymagania  | 20        |
| 8. Światło białe  | 21        |
| 9. Hologramy odbiciowe i Dienisjuka   | 23        |
| 10. Wariacje układu rejestracji hologramów Dienisjuka   | 24        |
| 11. Materiały rejestrujące  | 25        |
| 12. Ekspozycja  | 26        |
| <b>WYKORZYSTANIE HOLOGRAMU ANALOGOWEGO W REALIZACJACH DZIEŁ PLASTYCZNYCH NA PRZYKŁADACH PRAC POWSTAŁYCH W LABORATORIUM HOLOGRAFICZNYM UNIWERSYTETU ARTYSTYCZNEGO IM. MAGDALENY ABAKANOWICZ W POZNANIU</b> | <b>27</b> |
| Holografia artystyczna  | 29        |
| Analiza wybranych realizacji artystycznych pod kątem metod i użytych środków plastycznych   | 30        |
| 1. Światło odtwarzania (metody odtwarzania hologramów światła białego i tęczy)  | 30        |
| 2. Barwa światła odtwarzania (odtworzenie hologramów światła białego).  | 36        |
| 3. Odtwarzanie światłem o zmiennej barwie (hologramy tęcze oraz barwione hologramy światła białego).  | 36        |
| 4. Metoda wielokrotnego naświetlania hologramu transmisyjnego   | 39        |
| 5. Wykorzystanie transparentności błony holograficznej  | 40        |
| Uwagi końcowe   | 44        |
| <b>HOLOGRAMY DIENISJUKA — ZASTOSOWANIE PRAKTYCZNE</b>   | <b>45</b> |
| 1. Budowa przykładowego zestawu przeznaczonego do rejestracji hologramów Dienisjuka   | 45        |
| 2. Materiał rejestrujący: Color Photopolymer Bayfol® HX 200   | 45        |
| 3. Proces rejestracji hologramów  | 46        |
| 4. Wykorzystanie hologramów Dienisjuka w realizacjach artystycznych na wybranych przykładach  | 51        |
| 4.1. Multiplikacje hologramu  | 51        |
| 4.2. Realizacje interdyscyplinarne  | 53        |
| 4.3. Zestawienie gotowych obiektów z przedstawieniem holograficznym   | 55        |
| 4.4. Wykorzystanie hologramów Dienisjuka w obiektach o funkcji edukacyjnej  | 56        |
| <b>SŁOWNICZEK POJĘĆ UŻYTYCH W TEKŚCIE</b>   | <b>60</b> |
| <b>WYKAZ I ŹRÓDŁA ILUSTRACJI</b>  | <b>61</b> |
| <b>ENGLISH VERSION</b>  | <b>63</b> |
| <b>HOLOGRAPHY</b>   | <b>64</b> |
| 1. What is holography   | 64        |
| 2. Have you seen a hologram?  | 64        |
| 3. Pictorial holography in the daily life of the artist   | 69        |

|   |            |
|---|------------|
| 4. The origins and development of holography  | 71         |
| 5. The principle of holographic recording   | 74         |
| 6. The principle of holographic reconstruction  | 76         |
| 7. Requirements   | 78         |
| 8. White light  | 78         |
| 9. Reflection and Denisyuk holograms  | 80         |
| 10. Variations of Denisyuk hologram recording system  | 81         |
| 11. Recording materials   | 82         |
| 12. Exposure  | 83         |
| <b>USING ANALOGUE HOLOGRAMS IN ARTISTIC OBJECTS AS EXEMPLIFIED IN ARTWORK MADE IN THE HOLOGRAPHIC LABORATORY AT THE MAGDALENA ABAKANOWICZ UNIVERSITY OF ART IN POZNAN</b> | <b>85</b>  |
| Holographic art   | 87         |
| Technical methods and artistic means used in some examples of artworks  | 88         |
| 1. Reconstruction light (methods of reconstructing white-light holograms and rainbow holograms)   | 88         |
| 2. Reconstruction light colour (reconstructing white-light holograms)   | 94         |
| 3. Reconstruction made with variable-colour light (rainbow holograms and coloured white-light holograms)  | 94         |
| 4. Multiple illumination of a transmission hologram   | 97         |
| 5. Exploiting the transparency of holographic film  | 97         |
| Concluding remarks  | 102        |
| <b>DENISYUK HOLOGRAMS — PRACTICAL APPLICATION</b>   | <b>103</b> |
| 1. Construction of an exemplary set used to record Denisyuk holograms   | 103        |
| 2. The recording material: Color Photopolymer Bayfol® HX 200  | 103        |
| 3. The process of recording a hologram  | 104        |
| 4. The use of Denisyuk holograms in artistic work, presented on select examples   | 109        |
| 4.1. Multiplications of a hologram  | 109        |
| 4.2. Interdisciplinary art objects  | 110        |
| 4.3. Juxtaposition of ready-made objects with a holographic representation  | 113        |
| 4.4. Using Denisyuk holograms in art objects with an educational function   | 114        |
| <b>GLOSSARY</b>   | <b>117</b> |
| <b>SOURCES OF PHOTOGRAPHS USED IN THE TEXT</b>  | <b>119</b> |
| <br>  |            |
| <b>NORSK VERSJON</b>  | <b>121</b> |
| <b>HOLOGRAFI</b>  | <b>122</b> |
| 1. Hva er holografi   | 122        |
| 2. Har du sett et hologram?   | 122        |
| 3. Billedholografi i kunstnerens daglige liv  | 126        |
| 4. Opprinnelse og utvikling av holografi  | 129        |
| 5. Prinsippet for holografisk opptak  | 131        |
| 6. Prinsippet for holografisk rekonstruksjon  | 133        |
| 7. Krav   | 135        |
| 8. Hvitt lys  | 136        |

|  |            |
|--|------------|
| 9. Refleksjon og Denisyuk hologrammer  | 138        |
| 10. Varianter av Denisyuk-hologramopptakssystemet  | 139        |
| 11. Opptaksmaterialer  | 140        |
| 12. Eksponering  | 141        |
| <b>BRUK AV ANALOGE HOLOGRAMMER I KUNSTOBJEKTER SOM EKSEMPLIFISERT I KUNSTVERK LAGET VED HOLOGRAFILABORATORIET VED MAGDALENA ABAKANOWICZ UNIVERSITETET FOR KUNST I POZNAN</b> | <b>141</b> |
| Holografisk kunst  | 144        |
| Tekniske metoder og kunstneriske midler brukt i noen eksempler på kunstverk  | 145        |
| 1. Rekonstruksjonslys (metoder for å rekonstruere hvitt lys-hologrammer og regnbue-hologrammer)  | 145        |
| 2. Rekonstruksjonslysens farge (rekonstruksjon av hvitt lys-hologram)  | 151        |
| 3. Rekonstruksjon utført med varierende farget lys (rainbow-hologrammer og fargede hvitt lys-hologrammer)  | 151        |
| 4. Multiple belysning av en overføringshologram  | 154        |
| 5. Utnyttelse av gjennomsiktigheten til holografisk film   | 155        |
| Avsluttende kommentarer  | 159        |
| <b>DENISYUK-HOLOGRAFIER — PRAKTISK BRUK</b>  | <b>160</b> |
| 1. Konstruksjon av et eksemplarisk sett brukt til å registrere Denisyuk-holografier  | 160        |
| 2. Opptaks materialet: Fargefotopolymer Bayfol® HX 200   | 160        |
| 3. Prosessen med å ta opp et hologram  | 161        |
| 4. Bruk av Denisyuk-hologrammer i kunstnerisk arbeid, presentert på utvalgte eksempler   | 166        |
| 4.1. Multiplikasjoner av et hologram   | 166        |
| 4.2. Tverrfaglige kunstobjekter  | 167        |
| 4.3. Sammenstilling av ferdige objekter med en holografisk representasjon  | 170        |
| 4.4. Bruk av Denisyuk-hologrammer i kunstobjekter med en pedagogisk funksjon   | 171        |
| <b>GLOSSAR</b>   | <b>175</b> |
| <b>KILDER TIL FOTOGRAFIER BRUKT I TEKSTEN:</b>   | <b>176</b> |

**HOLOGRAFIA ARTYSTYCZNA**  
WERSJA POLSKA

# HOLOGRAFIA

Poradnik wykorzystania techniki holograficznej do celów artystycznych

## 1. Czym jest holografia

Używany od wielu lat termin *holografia* trafił do zasobów słownictwa potocznego. Znaczenie tego słowa nie zawsze jednak jest wówczas tożsame z jego prawdziwą definicją. Pojęcie *holografia* bowiem należy do pojęć z dziedziny optyki, opisując metodę zapisu trójwymiarowej informacji o przestrzennej scenie w sposób cechujący się dużą wiernością. Encyklopedia *Britannica* definiuje je następująco:

Holografia oznacza tworzenie niepowtarzalnego obrazu fotograficznego bez użycia obiektywu. Zapis fotograficzny obrazu nazywa się hologramem. Wydaje się on nieczytelnym wzorem prążków o różnych kształtach i rozmiarach, ale oświetlony koherentną wiązką światła, wytwarzaną za pomocą lasera, porządkuje światło tak, że powstaje trójwymiarowe przedstawienie pierwotnego obiektu.

Holography, means of creating a unique photographic image without the use of a lens. The photographic recording of the image is called a hologram, which appears to be an unrecognizable pattern of stripes and whorls but which — when illuminated by coherent light, as by a laser beam — organizes the light into a three-dimensional representation of the original object.

(<https://www.britannica.com/technology/holography>; dostęp 31.03.2023 r.)

Definicja encyklopedyczna wydaje się skomplikowana. Nie jest więc całkiem jasne, czym naprawdę jest hologram. Na razie przyjmijmy, za zacytowanym opisem z encyklopedii *Britannica*, że holografia jest metodą tworzenia trójwymiarowej reprezentacji obiektu lub sceny za pomocą wiązki światła. Jest to zatem sposób zapisu obrazu z zachowaniem trójwymiarowości, czyli przestrzeni i głębi. Innymi słowy, holografia pozwala pokazać bryłę, której przestrzenność możemy odebrać zmysłem wzroku. Można więc stwierdzić, że jest niematerialną rzeźbą. Trzeba jednak dodać, że holografia, a raczej pewne techniki holograficzne, ściślej mówiąc, umożliwiają użycie środków wyrazu trudnych do uzyskania albo nawet niemożliwych w rzeźbie.

Warto tu także wspomnieć, jak potocznie rozumie się słowa „holografia” i „holograficzny”. W najprostszym przypadku uważa się je za synonimy pojęć „przestrzenny” i „wierny”. Biorąc pod uwagę tylko definicję, w pewnej mierze nie można temu odmówić słuszności. Warto jednak pamiętać, że to tylko przybliżenie, skrót myślowy, i dlatego podchodzić z odpowiednią rezerwą do wielu potocznych, marketingowych i reklamowych sposobów użycia tych pojęć.

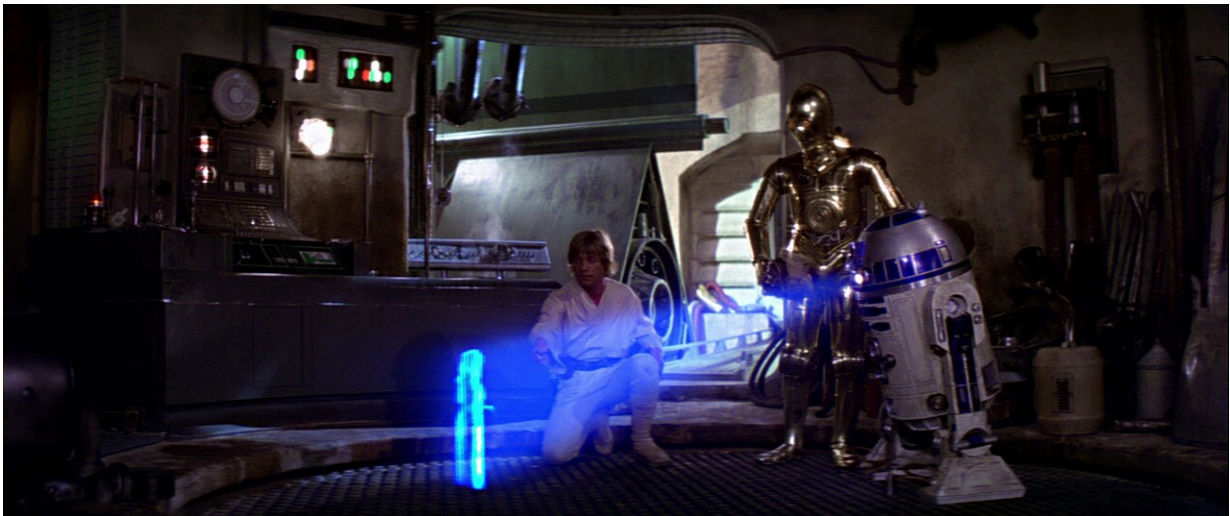
## 2. Czy widziałeś hologram?

W świecie, w którym zewsząd otaczają nas najnowsze rozwiązania techniczne, jest wielce prawdopodobne, że niemal każdy człowiek, który choćby raz zawitał do dowolnego kraju wysoko- lub średniorozwiniętego, zetknął się z holografia i hologramami. Należy przy tym dodać, że wskutek powszechnego dostępu do informacji

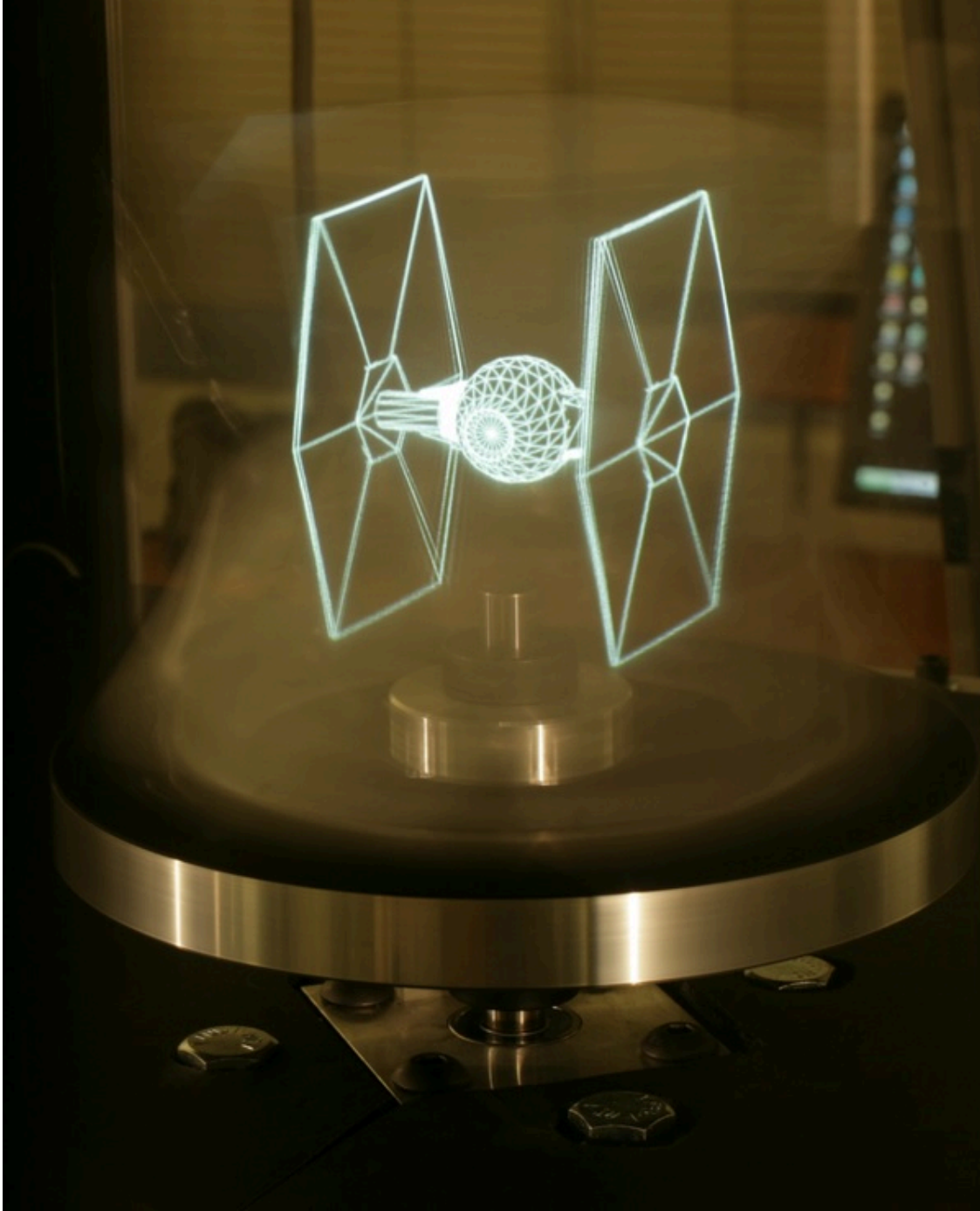
niemal każdy — niezależnie od pochodzenia czy miejsca zamieszkania — przynajmniej zna pojęcie *holografia*.

Najbardziej spektakularnym przykładem styczności z holografia jest słynna scena z filmu *Gwiezdne wojny: część IV – Nowa nadzieja*, w której Luke Skywalker odtwarza zapisany w pamięci robota R2-D2 trójwymiarowy obraz księżniczki Lei z przesłaniem dla Obi-Wana Kenobiego (ryc. 1). Projektcja taka zostaje powtórzona w tej części filmowej sagi, a obraz holograficzny wykorzystano w innych odcinkach serii *Gwiezdne wojny* jeszcze wielokrotnie.

Należy się tu czytelnikowi małe wyjaśnienie. Mamy tu do wprawdzie do czynienia z ideą holograficznej rekonstrukcji pewnej sceny, ale sama metoda projekcji ukazana w tym filmie pozostaje dla nas niedostępna. Oczywiście trwają prace nad tym, aby można zrealizować tę fantazję z 1977 roku, i można być niemal pewnym, że niebawem uda się to osiągnąć. Umiemy już bowiem tworzyć trójwymiarowe obrazy świetlne w przestrzeni (techniki wolumetryczne — zob. ryc. 2), choć trzeba dodać, że metody te wciąż się różnią od filmowej wizji. Cóż, poczekajmy jeszcze trochę.



Ryc. 1. Projektcja obrazu holograficznego użyta w filmie *Gwiezdne wojny: część IV – Nowa nadzieja*.



Ryc. 2. Metoda projekcji świetlnej tworząca w przestrzeni obraz pojazdu z filmu *Gwiezdne wojny*. W tym przypadku wykorzystano wirujące zwierciadło i projekcję światła niekoherentnego.

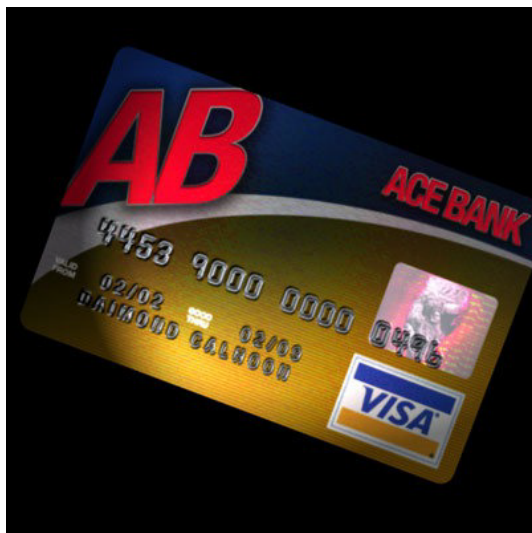
Innym przykładem zastosowania holografii w życiu codziennym są popularne zabezpieczenia przed niepożądanym kopiowaniem lub podrabianiem produktów. Należą do nich zabezpieczenia banknotów, kart bankowych, biletów itp. Powszechnie stosowane są paski i pola najczęściej zawierające przestrzenną informację w formie obrazu holograficznego. Dla przykładu na ryc. 3. ukazano pasek holograficzny na polskim



banknocie o nominale 500 zł. Podobne hologramy spotkamy na kartach bankowych, biletach czy nalepkach stosowanych na wielu produktach.



Ryc. 3. Banknot Narodowego Banku Polskiego o nominale 500 zł, w którym zastosowano zabezpieczenie holograficzne – pasek oznaczony numerem 2.



Ryc. 4. Hologram zabezpieczający kartę bankową.

Coraz powszechniejsze są produkty codziennego użytku wykorzystujące zjawisko dyfrakcji, czyli ugięcia światła towarzyszącego procesowi rekonstrukcji obrazu holograficznego. Wśród nich spotkamy ubrania, saszetki, paski, breloki, a nawet deskorolki. Nie są to hologramy *sensu stricto*, choć zasada ich działania jest identyczna, dlatego w powszechnym rozumieniu uważane są za użycie techniki holograficznej.





Ryc. 5. Ubiór damski wykonany z materiałów korzystających ze zjawiska dyfrakcji, tzw. tkaniny holograficznej.



Ryc. 6. Deskorolka wytworzona z zastosowaniem warstwy dyfrakcyjnej, tzw. holograficzna.

### 3. Holografia obrazowa w życiu codziennym artysty

Kolejnym etapem prezentacji techniki holograficznej jest omówienie jej najciekawszego zastosowania, mianowicie holografii obrazowej, w tym artystycznej. W odróżnieniu od przykładów podanych wyżej mówimy tutaj o przestrzennym odtworzeniu zarejestrowanego obiektu lub sceny w taki sposób, aby oglądający odnosił wrażenie, że ogląda rzeczywisty przedmiot lub scenę. Obraz taki będzie się zatem cechować wysoką wiernością oraz paralaksą, tj. możliwością obserwacji z różnych punktów.

Aby ukazać, o jakim rodzaju przekazu mówimy, najlepiej posłużyć się przykładami. W dziedzinie holografii artystycznej najsłynniejszą postacią jest bez wątpienia Margaret Benyon (1940–2016), brytyjska pionierka zastosowania techniki holograficznej w sztuce. Na ryc. 7. pokazano kopię jednego z jej najsłynniejszych hologramów, *Tigirl*. W pracy tej artystka wykorzystała metodę wielokrotnej ekspozycji, dzięki czemu uzyskała efekt wzajemnego przenikania się obrazów przestrzennych. W ostatecznej wersji prezentacyjnej *Tigirl* jest hologramem odbiciowym do oglądania w świetle białym.



Ryc. 7. Wieloekspozycyjny hologram wykonany laserem impulsowym: Margaret Benyon, *Tigirl*.



Ryc. 8. Hologram tęczowy oglądany w świetle białym.

Z kolei na ryc. 8 widzimy obraz odtworzony z hologramu tęczowego. Technika ta została wprowadzona przez Stephena Bentona pod koniec lat sześćdziesiątych XX wieku. Hologramy te cechują się brakiem paralaksy pionowej przy zachowaniu paralaksy poziomej. Można je odtwarzać z wykorzystaniem światła białego, niekoherentnego. Hologramy tęczowe są hologramami typu transparentnego. Oglądany obraz mieni się barwami tęczy, gdyż w procesie rekonstrukcji obrazu widzialnego zachodzi selektywne zjawisko dyfrakcji. Polega ono na tym, że poszczególne fragmenty struktury prążkowej hologramu odtwarzane są za pomocą fal o wąskim paśmie z kolejnego zakresu spektrum światła widzialnego, niejako „wybranego” z pełnego spektrum światła białego.

Innym przykładem wykorzystania holografii są prace wykonywane na Uniwersytecie Artystycznym w Poznaniu, autorstwa Jarosława Boguckiego i Szymona Zwolińskiego. Wykorzystują oni specyficzne cechy obrazu holograficznego, tj. przestrzenność i zmienność obrazu odtwarzanego w zależności od punktu, z którego jest oglądany, łącząc je z rzeczywistymi formami przestrzennymi w postaci rzeźb. Współistnienie obiektów przestrzennych i wiernego obrazu holograficznego pozwala na osiągnięcie absolutnie unikatowego efektu wizualnego. Przykładowe prace ukazano na ryc. 9–11.



Ryc. 9. Jarosław Bogucki, *Narcyz*, wys. 270 cm, brąz, hologram, płyta wiórowa, stal, 2018.

Ryc. 10. Jarosław Bogucki, *Słowo w słowo*, 40×50 cm — hologram, 2018.



Ryc. 11. Szymon Zwoliński, *Bez tytułu* (autoportrety holograficzne 1, 2) z serii *Wypalenie*, 2019–2020.

Za specyficzną odmianę techniki holograficznej możemy uznać hologramy Dienisjuka. Nazwa upamiętnia Jurija Nikołajewicza Dienisjuka, rosyjskiego naukowca będącego pomysłodawcą tej techniki wykonywania hologramów. Zalety hologramów typu Dienisjuka to najprostszy układ do rejestracji oraz uzyskanie hologramu do odtwarzania w świetle białym. Ponadto takie hologramy łatwo rozpoznać, zrekonstruowany obraz leży bowiem całkowicie za płaszczyzną hologramu, co wywołuje wrażenie oglądania gabloty wystawienniczej.



Ryc. 12. Prof. Wencisław Sajnow demonstruje wykonany metodą Dienisjuka hologram dwóch XIX-wiecznych pistoletów używanych przez rosyjską armię. Hologram wykonano w jego instytucji w 1982 r. z użyciem emulsji należących do najlepszych materiałów stosowanych w ZSRS, dzięki czemu jest to obecnie cenny obiekt kolekcjonerski.

#### 4. Powstanie i rozwój holografii

Podstawy zapisu holograficznego zawdzięczamy pracującemu w latach dwudziestych XX wieku polskiemu fizykowi Mieczysławowi Wolfkemu, którego prace dotyczyły bezsoczewkowego zapisu obrazu siatki molekularnej. Ogólną teorię zapisu holograficznego opracował natomiast na przełomie lat czterdziestych i pięćdziesiątych Dennis Gabor, węgierski fizyk działający w Wielkiej Brytanii. Technika opisana przez Gabora miała umożliwić zwiększenie rozdzielczości mikroskopu elektronowego w celu obserwacji pojedynczych atomów. Mogła jednak również zostać wykorzystana do kodowania informacji obrazowej. Gabor przeprowadził nawet próby zapisu prostych obiektów w układzie rejestracji osiowej. Stosował jednak lampę rtęciową o stosunkowo niskiej koherencji, toteż nie uzyskał zadowalających efektów. Dopiero urządzenia emitujące strumień świetlny o wysokiej koherencji, tj. lasery, które pojawiły się pod

koniec lat pięćdziesiątych, przyczyniły się do większego zainteresowania holografia. W 1962 roku Amerykanin Emmett N. Leith i Łotysz Juris Upatnieks dokonali pierwszego zapisu holograficznego w układzie pozaosiowym z użyciem lasera gazowego o emisji ciągłej. To zapoczątkowało błyskawiczny rozwój holografii.

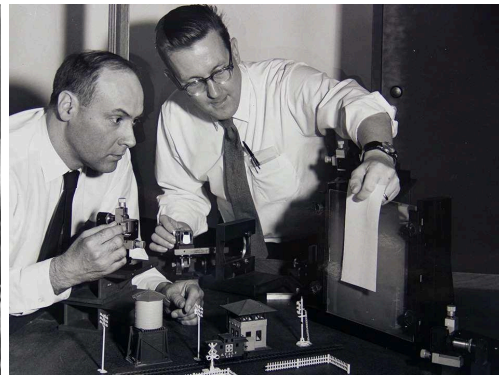
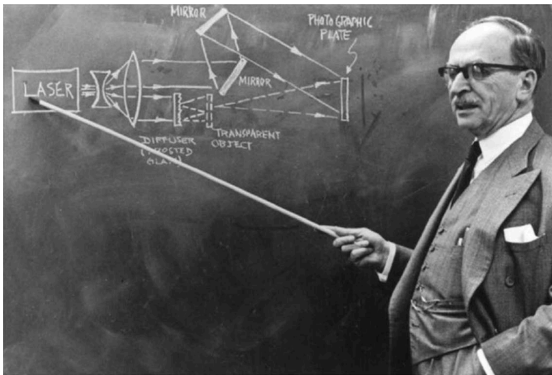
Mniej więcej do połowy lat siedemdziesiątych sukcesywnie ukazywały się prace poświęcone różnorodnym technikom holograficznymi i ich zastosowaniom. Konieczność stosowania skomplikowanych układów optomechanicznych oraz wysokie koszty obsługi stanowisk holograficznych wpłynęły na spadek intensywności prac w drugiej połowie lat siedemdziesiątych.

Należy jednocześnie wspomnieć, że w roku 1972 Leonid Jarosławski i Nikołaj Mierzlakow opracowali teoretyczne podstawy zapisu hologramów metodami dyskretnymi. Rozpowszechnienie laserów, postęp w dziedzinie mediów rejestrujących stosowanych w holografii oraz działalność ludzi znajdujących w holografii doskonały i niepowtarzalny środek wyrazu artystycznego wywołały obecny renesans holografii. Bardzo wiele ośrodków naukowych, badawczo-rozwojowych oraz nastawionych na działalność komercyjną (wspomnijmy powszechnie stosowane hologramy zabezpieczające), a także studiów holografii reklamowej i artystycznej nieustannie prowadzi prace mające zapewnić rozwój i doskonalenie metod zapisu pełnej, trójwymiarowej informacji obrazowej o obiekcie i scenie.

Niezmiernie istotnym etapem w rozwoju holografii było opracowanie cyfrowej metody druku holograficznego, czego dokonał Stanislovas Zacharovas (dyrektor litewskiego laboratorium Geola). W tym procesie korzysta się z kamery holograficznej zbierającej dane wejściowe w świetle niekoherentnym i drukarki holograficznej, która na podstawie tych danych „drukuję” w sposób optyczny siatkę dyfrakcyjną na nośniku ciągłym. Trójwymiarowy obraz zostaje odtworzony w świetle białym z zachowaniem pełnej paralaksy poziomej.



Ryc. 13. Mieczysław Wolfke.



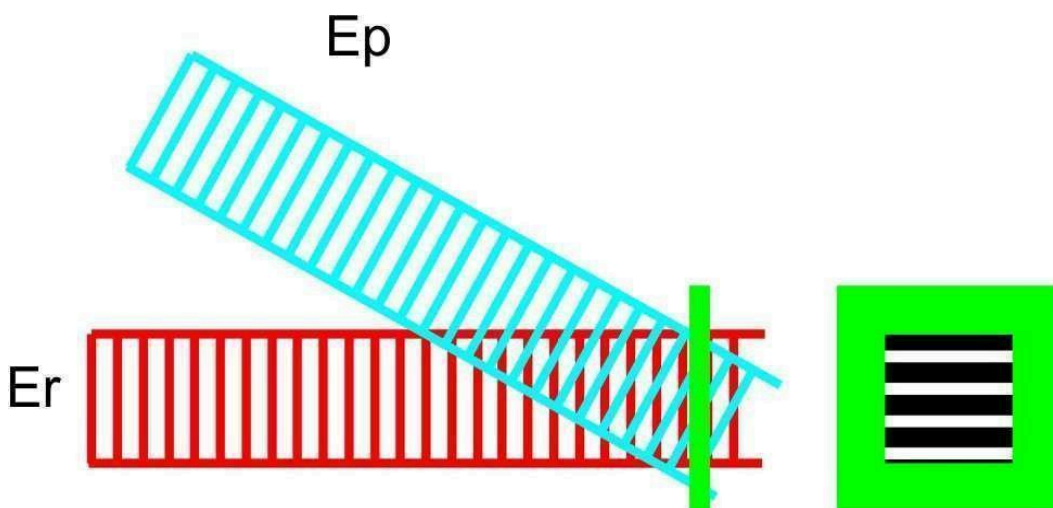
Ryc. 14–15. Po lewej Dennis Gabor, po prawej Emmett Leith i Juris Upatnieks.



Ryc. 16. Drukarka holograficzna firmy Geola.

### 5. Zasada zapisu holograficznego

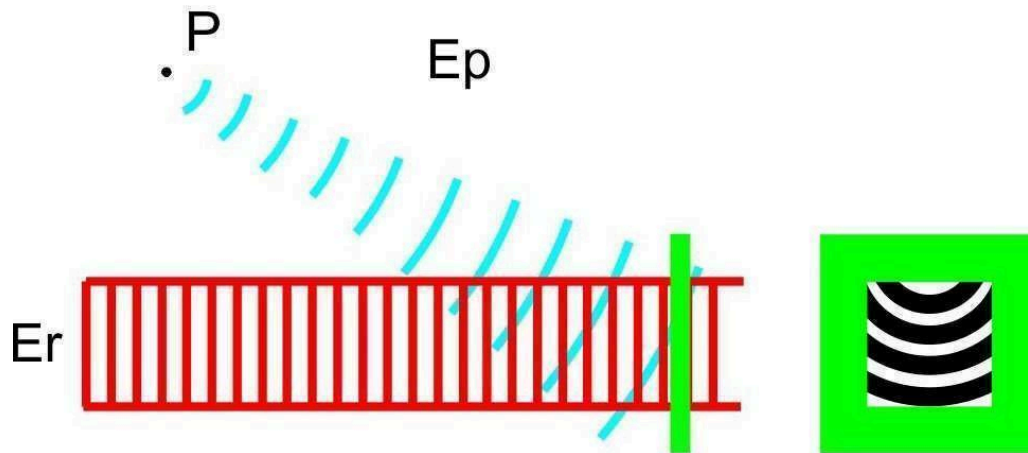
W każdym układzie holograficznej rejestracji obrazu występują dwie interferujące z sobą wiązki. W najprostszym przypadku są to dwie fale płaskie. Jeśli zostaną one skierowane pod pewnym kątem w stosunku do siebie na jakieś medium rejestrujące, uzyska się siatkę prążków prostoliniowych. Na ryc. 17 ukazano położenie rejestratora i schematyczny wygląd zarejestrowanego mikrointerferogramu. Wprowadźmy tutaj pojęcie fali referencyjnej, którą w procesie holograficznym można uważać za odniesienie (to fala  $E_r$ ). Natomiast fala przedmiotowa ( $E_p$ ) to wiązka niosąca informację o scenie lub przedmiocie, które są rejestrowane.



Ryc. 17. Interferencja dwóch fal płaskich generuje siatkę prążków prostoliniowych.  $E_r$  — fala referencyjna,  $E_p$  — fala przedmiotowa.

Jeżeli w jednej z gałęzi dokonamy modyfikacji fali padającej na medium (np. będzie to fala sferyczna, której źródłem jest punkt świecący), w płaszczyźnie zapisu obrazu

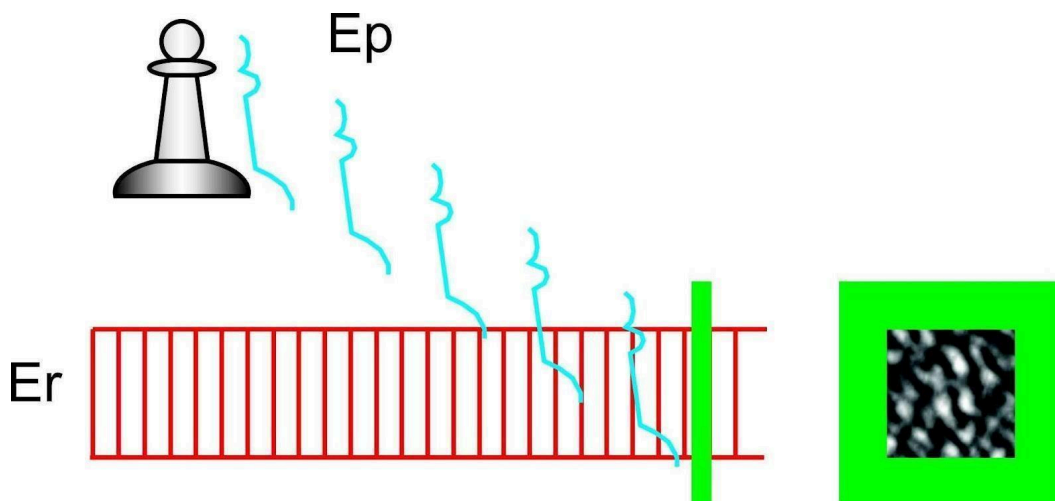
otrzymamy mozaikę kołowych prążków interferencyjnych (ryc. 18). W przypadku szczególnym, gdy obie wiązki mają ten sam kierunek i zwrot, środkiem okręgów wyznaczonych przez prążki będzie sam środek zarejestrowanego hologramu.



Ryc. 18. Interferencja płaskiej fali referencyjnej  $E_r$  i sferycznej fali przedmiotowej  $E_p$  generuje siatkę prążków koncentrycznych.

Zastosujmy teraz bardziej skomplikowaną modyfikację. Załóżmy, że jedna z fal to front falowy dokładnie odpowiadający jakiemuś obiektowi. Może to być np. fala odbita od obiektu, który zamierzamy holografować. W miejscu rejestracji nastąpi interferencja obu fal, referencyjnej  $E_r$  i przedmiotowej  $E_p$ , w wyniku czego otrzymamy nieregularną, pozornie bezładną plątaninę prążków o różnym położeniu i różnym kontraście (ryc. 19). Pełna informacja o przedmiocie została tutaj zakodowana w kontraście i lokalizacji prążków. Są to luminancja przedmiotu, czyli informacja amplitudowa, mówiąca o rozkładzie odcieni szarości na jego powierzchni, oraz informacja fazowa, odpowiadająca za przestrzenność obiektu.





Ryc. 19. Interferencja fali referencyjnej  $E_r$  o płaskim czole i fali przedmiotowej  $E_p$  pochodzącej od złożonego obiektu wywołuje skomplikowaną siatkę prążków, którą można rozumieć jako zakodowaną informację o cechach fali przedmiotowej, a zatem zakodowaną informację o scenie lub obiekcie.

## 6. Zasada rekonstrukcji holograficznej

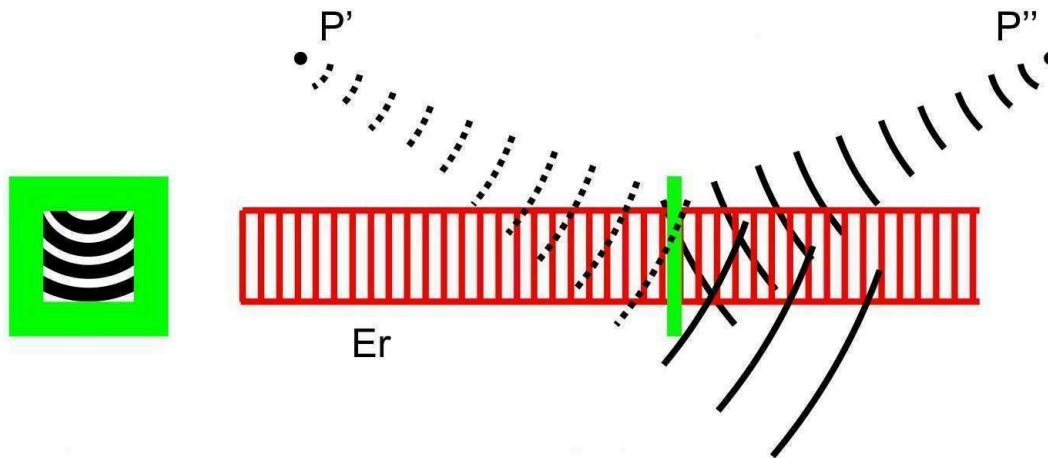
W holografii wzór prążkowy (mikrointerferogram) uzyskany w wyniku interferencji fal referencyjnej i przedmiotowej zostaje zapisany na jakimś medium rejestrującym, np. na kliszy holograficznej, będącej szczególnym materiałem światłoczułym, zawierającym najczęściej warstwę halogenosrebrową. Obserwując tak powstały hologram gołym okiem, nie jesteśmy w stanie odczytać żadnej informacji. Widzimy jedynie bezładne, nic niemówiące drobne plamki, na przemian ciemne i jasne (gdy są oglądane w dużym powiększeniu).

Warunkiem powstania obrazu holograficznego jest odpowiednie oświetlenie hologramu. Jedynie spełnienie tego warunku umożliwi rekonstrukcję obrazu w wyniku dyfrakcji światła oświetlającego hologram na zarejestrowanej mikrostrukturze prążkowej oraz odtworzenie fali przedmiotowej z bardzo wysoką wiernością. Można powiedzieć, że fala zrekonstruowana z hologramu będzie jakby fragmentem fali pochodzącej od rzeczywistej sceny lub obiektu.

Zgodnie z zasadą działania dyfrakcji część energii fali padającej na element dyfrakcyjny (czyli w omawianym tu przypadku hologram) zostanie rozpropagowana zgodnie z jej kierunkiem początkowym. Tę falę będziemy nazywali zerowym rzędem dyfrakcyjnym. Część natomiast zostanie ugięta tak, jak wymusi to struktura mikrointerferogramu. Będą to pierwsze i ewentualnie kolejne rzędy dyfrakcyjne. W technice holografii interesuje nas tylko rząd pierwszy.

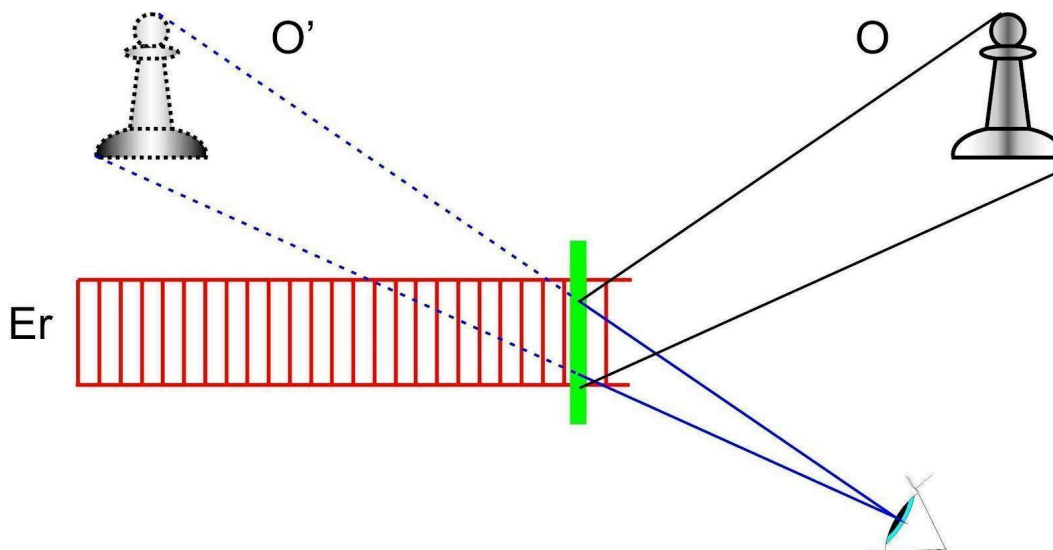
Załóżmy, że korzystamy z hologramu zapisanego w układzie z ryc. 18, gdzie obiektem było punktowe źródło światła. Oświetlając zapisaną na hologramie strukturę mikrointerferogramu falą identyczną z falą referencyjną użytą podczas zapisu, otrzymamy dwa obrazy źródła punkowego — pozorny i rzeczywisty (por. ryc. 20). W klasycznym przypadku w wyniku rekonstrukcji powstaną dwa obrazy:  $P'$  — prosty, pozorny, będący niemal doskonałą kopią obiektu, oraz  $P''$  — sprzężony, rzeczywisty. Obraz  $P''$  możemy uważać za odwrócenie oryginału, obraz przeciwstawny oryginałowi.

(Ponieważ z punktu widzenia obrazowania mniej on nas interesuje, a ponadto rzadko się z niego korzysta w obrazowaniu, poprzestańmy na tym, że taki obraz fizycznie istnieje).



Ryc. 20. Rekonstrukcja hologramu zapisanego w układzie jak na ryc. 18. Osoba oglądająca odtworzenie tego hologramu (tj. obraz pozorny  $P'$ ) będzie odnosić wrażenie, że patrzy na rzeczywiste Źródło światła punkтового wykorzystane przy rejestracji (tj.  $P$  na ryc. 18). Tak, chcemy powiedzieć właśnie to, że  $P'$  będzie dla oglądającego identyczne z  $P$ .

Gdy teraz zamienimy nasz hologram na taki zawierający informacje o jakimś przedmiocie (np. pochodzący z rejestracji w układzie z ryc. 19) i oświetlimy go falą rekonstruującą zgodną z falą referencyjną  $E_r$ , to w wyniku zjawiska dyfrakcji fala rekonstruująca ugnie się tak, aby pierwsze rzędy dyfrakcyjne stworzyły dwa obrazy przedmiotu — pozorny i rzeczywisty (ryc. 21). Obraz pozorny będzie obrazem stereoskopowym, czyli będzie dokładnie odpowiadał cechom przedmiotu i będzie się znajdował w tym samym „miejscu” co przedmiot. Można go zaobserwować gołym okiem, lub sfotografować za pomocą aparatu fotograficznego tak samo, jakby był fotografowany przedmiot. Będzie miał też pełną paralaksę poziomą i pionową, czyli obserwator będzie mógł „zajrzeć” za obiekt z dowolnej strony, jak też ponad nim. Paralaksa ograniczona jest niejako „oknem” hologramu.



Ryc. 21. Hologram zarejestrowany w układzie z ryc. 19, oświetlony wiązką rekonstruującą zgodną z wiązką referencyjną  $E_r$  użytą podczas rejestracji, umożliwi odtworzenie wiernej kopii fali reprezentującej rzeczywisty obiekt. Dzięki temu — przede wszystkim w tym przypadku — obserwator będzie miał wrażenie, że ogląda rzeczywisty obiekt. Dlatego holografia jest najwierniejszym zapisem informacji obrazowej o scenie lub obiekcie.

## 7. Wymagania

Kilka warunków musi zostać spełnionych, aby hologram został prawidłowo zapisany. Przede wszystkim, zgodnie z podstawami fizyki, zjawisko interferencji wymaga zastosowania fal koherentnych, czyli spójnych. Koherencją nazywa się zdolność zachowania stałej różnicy faz w trakcie propagacji. Fale ponadto muszą być zgodne pod względem azymutu polaryzacji, monochromatyczne i stabilne w czasie. Źródłem światła spełniającym te wymagania jest laser. Jednakże nie każdy laser nadaje się do użycia w holografii, niektóre lasery bowiem nie mają parametrów wystarczających do uzyskania jednorodnego pola interferencyjnego podczas zapisu hologramu.

Trzeba ponadto zachować stabilność układu rejestrującego podczas zapisu. Jest podobnie jak w fotografii, gdzie uzyskamy obraz obarczony wadami, gdy w czasie naświetlania nie zachowamy niezmienności układu rejestrującego, sceny lub obiektu. W przypadku holografii niezachowanie stabilności pola interferencyjnego spowoduje podobny skutek. Prążki będą gorsze albo zostaną utracone całkowicie. Jednakże wymogi są tu znacznie bardziej rygorystyczne, gdyż prążki mikroiinterferogramu mają bardzo małe wymiary (rzędu  $\mu\text{m}$ – $\text{nm}$ ). Podsumowując, musimy podkreślić, że trzeba zadbać o bardzo dobrą sztywność układu rejestrującego i maksymalne odizolowanie od wpływu czynników zewnętrznych, tj. drgań i zmian temperatury.

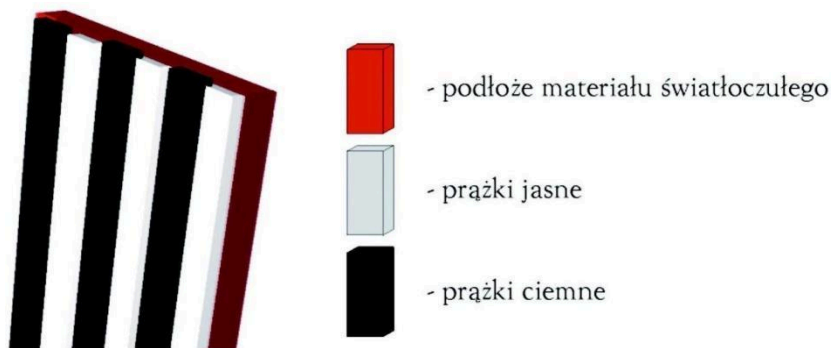
We współczesnej praktyce wymienione wyżej wymogi nietrudno spełnić. Bardzo łatwo zapewnić sztywność, wystarczy starannie zaprojektować i wykonać konstrukcję stanowiska. Z pozostałymi wymogami można sobie poradzić np. poprzez maksymalne ograniczenie czasu ekspozycji rejestratora. Należy przy tym pamiętać o pewnych prostych zależnościach. Im bardziej światłoczuły materiał i im intensywniejsza wiązka lasera, tym krótszy czas rejestracji jest konieczny. W praktyce okazuje się, że przy

zachowaniu rygorystycznych ograniczeń czasu holografii można stosować nawet przy użyciu stosunkowo prostych i tanich laserów (np. diod laserowych) oraz przy pewnej niestabilności samego układu (możliwa jest rejestracja nawet obiektów niestabilnych).

## 8. Światło białe

Dotychczas omawialiśmy głównie przypadki, w których zarówno w procesie rejestracji, jak i rekonstrukcji konieczny był laser, a więc Źródło światła, które nie znajduje się w każdej szufladzie. Oczywiście stanowiło to znaczącą przeszkodę w popularyzacji holografii i obrazu holograficznego, dlatego opracowano metody przygotowywania hologramów, które można oglądać z wykorzystaniem światła niekoherentnego i o szerokim spektrum (niemonochromatycznego, także białego). Co prawda współczesna technologia pozwala nawet zbierać dane wejściowe do procesu rejestracji z pominięciem wymogu koherencji, ale ten wątek w niniejszym opracowaniu pominiemy. Zachęcamy do poszukiwań i poszerzania wiedzy w tym zakresie!

Gdy spojrzymy na rysunki przedstawiające proces rejestracji holograficznej (ryc. 17, 18, 19), zauważymy, że prążki interferencyjne układają się we wzór zmieniający się w płaszczyźnie rejestratora (emulsji). Jeżeli weźmiemy materiał z tak zarejestrowanym hologramem i obejrzymy go pod dużym powiększeniem, zobaczymy (w ogólnym przypadku) prążki układające się wzdłuż krawędzi tego materiału (hologramu) — zob. ryc. 22. Odtwarzanie takiego hologramu ukazano na ryc. 20 i 21. Jeśli w tym procesie światło lasera zastąpimy światłem białym, rekonstrukcja zostanie zaburzona, nie uzyskamy żadnego obrazu. Odbiorcy na pewno się to nie spodoba.



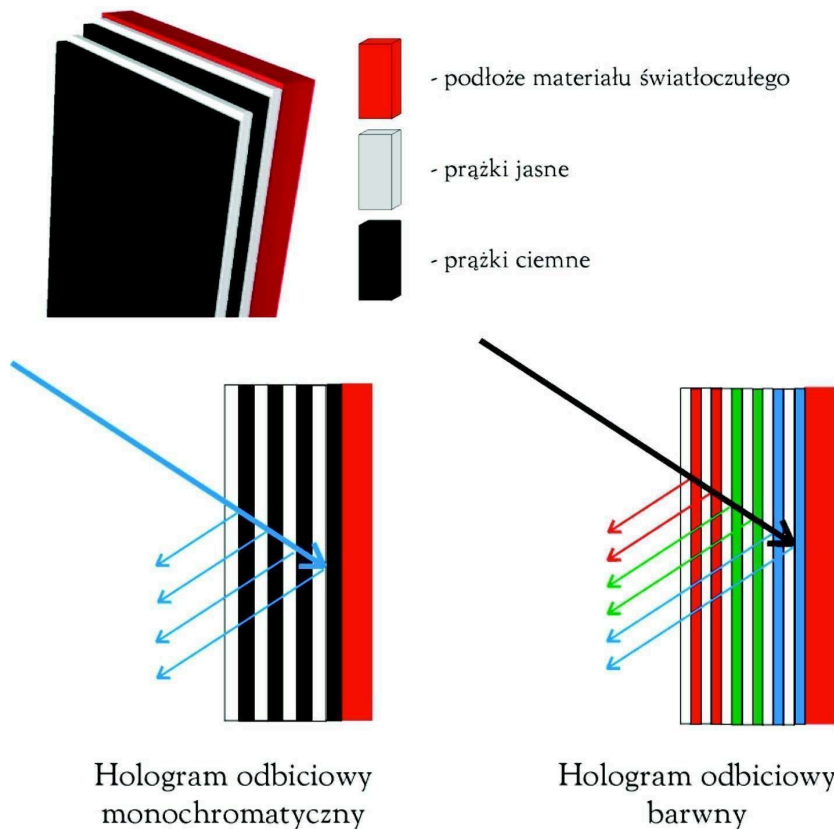
Ryc. 22. Prążki hologramu tzw. tradycyjnego układają się we wzór zmieniający się w płaszczyźnie materiału. Wzór jest zmienny i zależy od wymiarów hologramu. Na rysunku dla uproszczenia pokazano prążki prostoliniowe (takie prążki powstaną w przypadku interferencji dwóch fal o płaskim czole), ale w holografii struktura prążków jest dużo bardziej skomplikowana.

Jednakże hologram będziemy mogli oglądać w świetle białym i uzyskać pełne odtworzenie obrazu holograficznego — tj. z zachowaniem przestrzeni, paralaksy — jeśli zastosujemy metodę, która pozwoli wykorzystać selektywność dyfrakcyjnych siatek objętościowych (dyfrakcja Bragga). Model takiej siatki przedstawia ryc. 23.

Siatkę objętościową (w naszym przypadku to hologram objętościowy lub gruby)

możemy sobie wyobrazić jako prążki, których wzór zmienia się wraz z grubością nośnika (emulsji). Jeśli taki hologram oświetlimy światłem białym, dyfrakcja zajdzie tylko dla określonej długości fali. Dzięki temu światło źródła odtwarzającego nie musi być monochromatyczne. Trzeba jednak zapewnić odtwarzanie z wykorzystaniem źródeł o jak najmniejszych wymiarach, najlepiej punktowych. Gdy ten warunek nie jest spełniony, odtworzonych zostaje wiele obrazów o różnych położeniach, zatem obraz holograficzny będzie nieostry, rozmyty. Dlaczego tak się dzieje? Źródło światła o skończonym wymiarze (rozciągnięte) można sobie wyobrazić jako zestaw źródeł punktowych. Każde takie źródło, będące niejako składowym źródłem punktowym naszego źródła rozciągniętego, będzie powodować odtwarzanie obrazu w nieco innym położeniu. Złożenie tych odtworzeń da obraz zwielokrotniony, rozmyty, niewyraźny.

Gdy taką siatkę objętościową wykona się tak, aby zawierała trzy warstwy, z których każda będzie dyfrakcyjną siatką objętościową dostosowaną do każdej z trzech długości fali, odpowiadających trzem podstawowym składowym (RGB), uzyskamy odtworzenie obrazu barwnego przy użyciu tylko jednego źródła światła — punktowego światła białego. Wytworzymy wtedy zatem barwny hologram do oglądania w świetle białym, odbitym.



Ryc. 23. Struktura siatki objętościowej (hologramu objętościowego lub grubego) składa się z prążków układających się we wzór zmieniający się wraz z grubością nośnika. W przypadku takich siatek dyfrakcja

następuje przy ściśle określonej długości fali. Jeśli hologram objętościowy składa się z trzech warstw, czyli trzech siatek objętościowych, uzyskujemy odtworzenie obrazu barwnego.

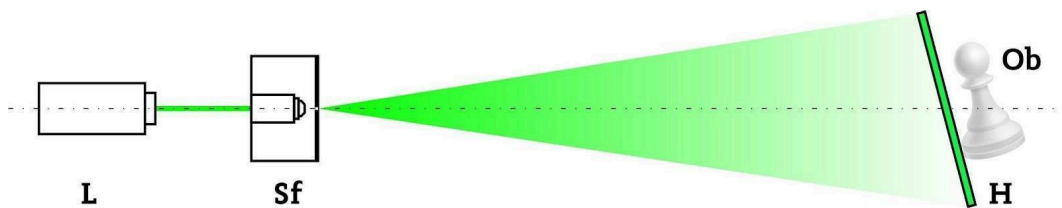
## 9. Hologramy odbiciowe i Dienisjuka

Przejdźmy zatem do sposobów rejestrowania hologramów odbiciowych, tj. z prążkami objętościowymi. Hologram nazywany płaskim, tj. z prążkami układającymi się we wzór zmieniający się w płaszczyźnie hologramu, uzyskuje się w układach, w których wiązka przedmiotowa  $E_p$  i wiązka referencyjna  $E_r$  padają na rejestrator z tego samego kierunku. Hologramy objętościowe, tzw. grube, w których prążki układają się we wzór zmieniający się wraz z grubością nośnika, wymagają konfiguracji przeciwsojonej. Oznacza to, że wiązka przedmiotowa i wiązka referencyjna muszą docierać do rejestratora z przeciwnych stron.

Należy pamiętać, że położenie obrazu holograficznego będzie zgodne z położeniem rzeczywistego obiektu (oczywiście względem punktu odniesienia na samym hologramie), czyli będzie położony w tej samej odległości, pozostanie tej samej wielkości itp. Jeśli podczas rejestracji obiekt będzie w dużej odległości od płaszczyzny rejestratora, odtworzony obraz też będzie sprawiał wrażenie, że leży bardzo głęboko za płaszczyzną hologramu. Oczywiście można tak wykonać hologram objętościowy, aby odtworzony obraz holograficzny znajdował się w dowolnym położeniu względem płaszczyzny hologramu — może być nawet częściowo przed i częściowo za jego płaszczyzną — wymaga to jednak kopiowania, a ponadto jest stosunkowo skomplikowane i wymagające pod względem sprzętowym. Można się z takim procesem zapoznać w trakcie zajęć w laboratorium holografii impulsowej Uniwersytetu Artystycznego w Poznaniu.

Na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego stulecia rosyjski naukowiec Jurij Dienisjuk opracował sposób rejestracji objętościowej siatki dyfrakcyjnej z użyciem pojedynczej wiązki światła. W tej metodzie tworzy się układy rejestracji holograficznej, w których holografowany obiekt umieszcza się bezpośrednio za płaszczyzną medium rejestrującego (np. kliszy holograficznej), a od drugiej strony kieruje się nań wiązkę referencyjną  $E_r$ . Wytworzone w ten sposób hologramy nazywamy hologramami Dienisjuka.

W praktyce układ Dienisjuka używany do rejestracji hologramów jest najprostszym ze wszystkich stosowanych w technice holografowania. Do jego zbudowania konieczne są źródło światła koherentnego (laser), filtr przestrzenny (tzw. pinhol), uchwyt nośnika rejestrującego oraz umieszczony za tym uchwytem stolik pozwalający umieścić holografowany przedmiot w bezpośredniej bliskości płaszczyzny nośnika rejestrującego. Wtedy wiązka światła, która przejdzie przez materiał rejestrujący, odbije się od obiektu stojącego za nim i stanie się w układzie holograficznym wiązką obiektową  $E_p$ . Wiązka ta będzie interferować z wiązką referencyjną  $E_r$ . Przykład takiego układu pokazano na ryc. 24.

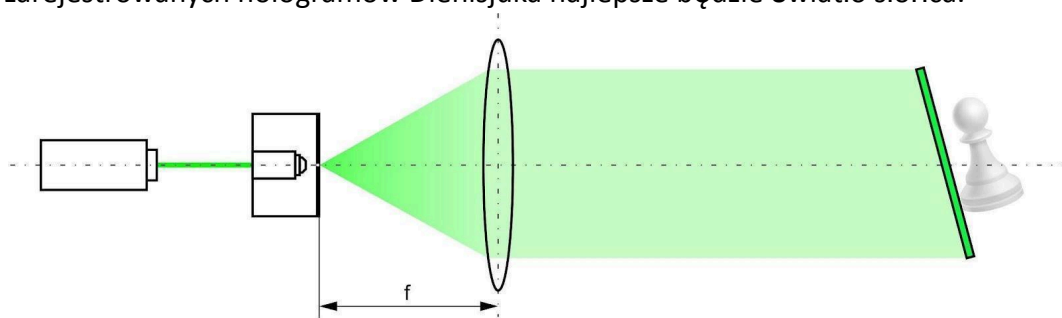


Ryc. 24. Podstawowy układ do rejestracji hologramów Dienisjuka. Wiązka światła koherentnego z lasera L dociera do układu filtra przestrzennego Sf (złożonego z obiektywu mikroskopowego i dokładnie wykonanego otworu o małej średnicy, tzw. pinhola). Zgodnie z zasadami fizyki falowej układ filtra stanowi bardzo dobre przybliżenie Źródła punktowego, za którym czoło fali staje się sferyczne. Wiązką tą oświetla się układ złożony z materiału rejestrującego H i przedmiotu Ob. Pochylenie H i Ob jest zalecane, ponieważ przy odtwarzaniu kierunek świecenia wiązki rekonstruującej powinien być zgodny z kierunkiem propagacji wiązki referencyjnej.

### 10. Wariacje układu rejestracji hologramów Dienisjuka

Na ryc. 24 pokazano układ z filtrem przestrzennym Sf. Niestety jest to element stosunkowo drogi i dość skomplikowany w użyciu (wymaga wyjustowania). Można jednak uprościć układ i zamiast filtra Sf zastosować tylko obiektyw mikroskopowy. Wadą takiego rozwiązania jest niejednorodność wiązki, co może powodować później np. plamy na obiekcie, nierównomierne oświetlenie fragmentów obiektu lub występujące niekiedy niepożądane wzorki interferencyjne. Czasami jednak warto się na to zdecydować, zyskując ułatwienie pracy.

Kolejną modyfikacją układu rejestracji z ryc. 24 jest wzbogacenie go o kolimator (zob. ryc. 25). To soczewka, która ma zamienić wiązkę o czole sferycznym na wiązkę o czole płaskim. Dzięki temu uzyskamy bardziej jednorodne oświetlenie obiektu. Kolimator musi mieć odpowiednio dużą średnicę, aby wiązka mogła padać na całą powierzchnię materiału rejestrującego. Przy odtwarzaniu warto zadbać o Źródło rekonstruujące jak najwierniej odwzorowujące układ rejestracji. W praktyce do rekonstrukcji tak zarejestrowanych hologramów Dienisjuka najlepsze będzie światło słońca.

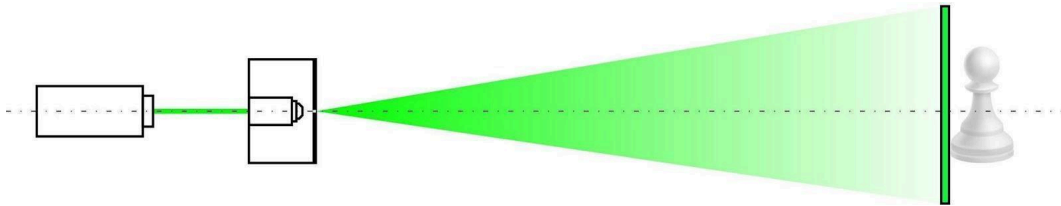


Ryc. 25. Układ rejestracji hologramów Dienisjuka z kolimatorem. Jeżeli chcemy uzyskać wiązkę o czole płaskim, Źródło światła punktowego (tj. pinhol) musi się znajdować dokładnie w ognisku soczewki. Sprawdza się to, np. mierząc średnicę wiązki w małej odległości za kolimatorem i w znacznie większej — średnica powinna być taka sama.

Dotychczas pisaliśmy, że rejestrator H i przedmiot Ob należy umieścić pod kątem w stosunku do osi optycznej. Co jednak zrobić, gdy nie możemy tego spełnić np. z powodu



ograniczeń mechanicznych lub wynikających z natury przedmiotu? Można wykonać rejestrację, używając wiązki prostopadle padającej na materiał rejestrujący (zob. ryc. 26). Wtedy także należy pamiętać, że Źródło światła oraz wiązka referencyjna muszą być ustawione tak samo w stosunku do hologramu. Światło przy odtwarzaniu powinno zatem padać na hologram prostopadle.



Ryc. 26. Układ do rejestracji hologramów Dienisjuka z prostopadle padającą wiązką światła.

### 11. Materiały rejestrujące

Do rejestracji hologramów najczęściej stosuje się materiały holograficzne bazujące na halogenkach srebra (czyli podobne do emulsji fotograficznych, lecz o dużo większej rozdzielczości i niższej światłoczułości), dostępne przeważnie w postaci klisz lub błon.

Gdy wykorzystuje się błonę, najlepiej przed pracą odpowiednio ją przyciąć, aby można ją wygodnie umieścić w uchwycie. Należy w tym celu nakleić błonę na tafłę niegrubego szkła. Zarówno błony (naklejane na szkło), jak i klisze należy stosować tak, aby emulsja była skierowana do przedmiotu.

Materiały srebrne wymagają obróbki fotochemicznej w specjalnych roztworach. Pierwszym procesem jest wywoływanie holograficzne, później następuje płukanie, po czym odbielanie. Wywoływacz ma ujawnić obraz utajony, który powstał w wyniku ekspozycji. Zachodzi tu proces redukcji światłoczułych halogenków srebra do srebra metalicznego. Ponieważ w układzie holograficznym z tworzącymi się prążkami objętościowymi ich zmienność następuje wraz z grubością emulsji, materiał po prawidłowo przeprowadzonym procesie wywoływania powinien być silnie zaczerniony. Taki hologram nie nadaje się do odtwarzania, pochłonięłyby bowiem całe promieniowanie wiązki odtwarzającej. Aby umożliwić efektywną rekonstrukcję, wprowadza się do obróbki proces odbielania. Odbielanie ma za zadanie usunąć srebro metaliczne z wywołanych obszarów i spowodować, że zamiast siatki intensywnościowej (gdzie prążki hologramu różnią się jasnością) powstanie siatka fazowa (w której prążki różnią się współczynnikiem załamania światła). W przypadku hologramów grubych odbielanie jest konieczne, gdyż w przypadku siatki intensywnościowej prążki ciemne pochłaniałyby niemal całą moc promieniowania wiązki odtwarzającej, uniemożliwiając rekonstrukcję (lub powodując jej bardzo słabą wydajność i kiepską widoczność obrazu). Proces obróbki należy zakończyć dokładnym płukaniem i wysuszeniem materiału.

Drugim rodzajem rejestratorów chętnie stosowanych w holografii są materiały fotopolimerowe. Najważniejszą różnicą jest, że nie wymagają obróbki fotochemicznej, a ponadto pozwalają uzyskać bardzo dużą wydajność dyfrakcyjną (odtworzony obraz cechuje się bardzo wysoką jasnością i wyraźnością). Po zarejestrowaniu hologramu



wystarczy taki materiał utrwalić poprzez ekspozycję na światło ultrafioletowe. Ich przygotowanie jest jednak nieco bardziej wymagającym procesem. Arkusz fotopolimeru jest dość cienki i wiotki, toteż przed rejestracją należy go dokładnie nakleić na podłoże szklane. Niestety materiały te są bardzo wrażliwe na zanieczyszczenia. Nawet drobnutki pyłek lub niewielkie zanieczyszczenie podłoża spowoduje, że w tym miejscu nie zarejestrujemy siatki interferencyjnej i otrzymamy czarną plamę („dziurę”) na odtwarzanym obrazie. Szkło musi być płaskie, nie może mieć defektów, pęcherzy, wgłębnień ani zgrubień. Musi być czyste, starannie wymyte i wysuszone. Należy też zadbać, aby naklejanie odbywało się w czystym powietrzu, pozbawionym kurzu i pyłów. Tak przygotowany materiał umieszczamy w układzie, podobnie jak w przypadku materiałów halogenosrebrowych, warstwą światłoczułą, czyli fotopolimerem do obiektu.

## **12. Ekspozycja**

Ekspozycja jest parametrem, od którego w wielkim stopniu zależy jakość końcowego hologramu. Im lepszy kontrast prążków holograficznych, tym wyższa wydajność dyfrakcyjna i tym lepszy odtworzony obraz. O wartości ekspozycji decydują moc lasera i wielkość wiązki. Im wyższa moc i im mniejszy wymiar wiązki, tym wyższa będzie ekspozycja. Drugim parametrem decydującym o ekspozycji jest czas. Im jest dłuższy, tym większa ekspozycja. Dobierając te parametry, musimy dobrać ekspozycję odpowiednią do stosowanego materiału — do jego rodzaju i wymiarów.

Moc lasera mamy w praktyce stałą dla danego układu. Zmieniać natomiast możemy zwykle rozmiar wiązki w płaszczyźnie rejestratora. Tę wielkość będziemy dobierać tak, aby jak najrównomierniej oświetlić materiał holograficzny o założonych wymiarach. Gdy ustawimy odpowiednio układ rejestracji, możemy przystąpić do dobrania czasu ekspozycji.

Najlepiej byłoby zmierzyć gęstość wiązki światła padającej na płaszczyznę rejestratora. Jeśli jednak nie dysponujemy odpowiednim urządzeniem pomiarowym, pomocne mogą się okazać kalkulatory ekspozycji, np. narzędzie dostępne na stronie <https://www.geola.com/online-exposure-calculator/>. Należy pamiętać, że wyliczony czas jest wielkością przybliżoną, która nie musi być najlepsza w naszych warunkach. Warto zatem zrobić własne próby ekspozycji, zmieniając tylko jej czas, natomiast pozostawiając bez zmian pozostałe parametry oraz budowę układu i obiekt. Optymalnym będzie czas ekspozycji, dla którego uzyskamy najwyższą wydajność dyfrakcyjną — czyli najwyraźniejszy i najjaśniejszy obraz holograficzny.

W praktyce należy dążyć do jak najkrótszych czasów ekspozycji. Im krócej bowiem naświetlamy nośnik, tym mniejsze ryzyko wystąpienia niestabilności, które zrujniają nasz hologram.

## **WYKORZYSTANIE HOLOGRAMU ANALOGOWEGO W REALIZACJACH DZIEŁ PLASTYCZNYCH NA PRZYKŁADACH PRAC POWSTAŁYCH W LABORATORIUM HOLOGRAFICZNYM UNIWERSYTETU ARTYSTYCZNEGO IM. MAGDALENY ABAKANOWICZ W POZNANIU**

Laboratorium holograficzne jest wyposażone w system Geola's Pulsed Holography Studio HS-5 umożliwiające tworzenie do celów artystycznych hologramów analogowych do wielkości 100 × 100 cm. Prace powstające podczas procesu kształcenia studenci wykonują zgodnie z programem pracowni, w którym założono wykorzystanie hologramu jako zasadniczego środka ekspresji. To realizacje zadanych tematów, pod względem stopnia trudności dostosowanych do poziomu zdobywanej wiedzy i umiejętności studenta.

Realizacja zadań z wykorzystaniem hologramu jako elementu spójnej całości to wieloetapowy proces, w którym możemy wyodrębnić następujące elementy:

- przygotowanie obiektu bądź aranżację przestrzeni do zapisu holograficznego
- proces zapisu z koniecznym dobraniem odpowiednich parametrów światła
- ostateczną ekspozycję podporządkowaną specyficznym wymogom, które musi spełnić oświetlenie hologramu.

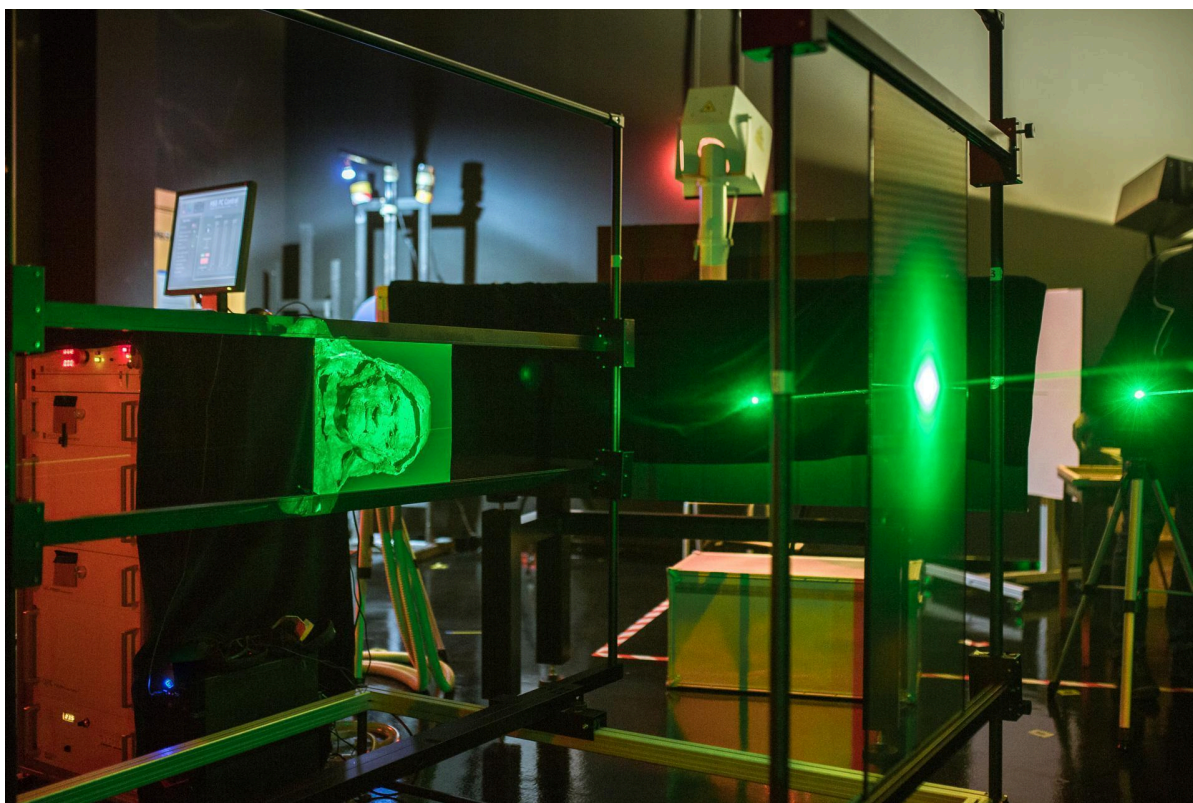
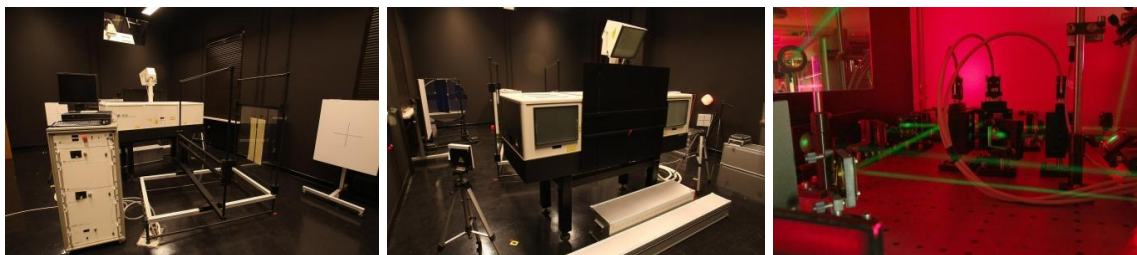
Opracowując proces dydaktyczny do realizacji w pracowni, brano pod uwagę powyższe etapy, które wyznaczają przebieg studenckich realizacji. Wielkie znaczenie ma wybór obiektu lub sytuacji do zholografowania. Ponieważ holografia polega na manipulacji rzeczywistym obrazem, trójwymiarowy obiekt lub fragment trójwymiarowej sytuacji może zaistnieć w nowej formie. Holografia pozbawia je materialności, prowadząc do iluzorycznego obrazu poddającego się różnym zabiegom kształtującym jego późniejszy wygląd. Przygotowanie obiektu często jest długotrwałym procesem, w którym wykorzystuje się różnorodne techniki rzeźbiarskie i warsztatowe, a umiejętnością istotną podczas tworzenia jest zdolność do patrzenia na obiekt i jego późniejsze otoczenie przez pryzmat hologramu — monochromatycznego kadru wycinka przestrzeni — jako formy docelowej.

W procesie twórczym dużą wagę przykładają się do umiejętności świadomego operowania wiązką obiektywą, ma to bowiem decydujący wpływ na końcowy efekt, oraz do kreatywnego podejścia do samego procesu naświetlania (np. poprzez próby naświetleń wielokrotnych czy tworzenie poklatkowych hologramów animowanych). Wielkie znaczenie ma również umiejętny dobór ostatecznej barwy hologramu w danej realizacji.

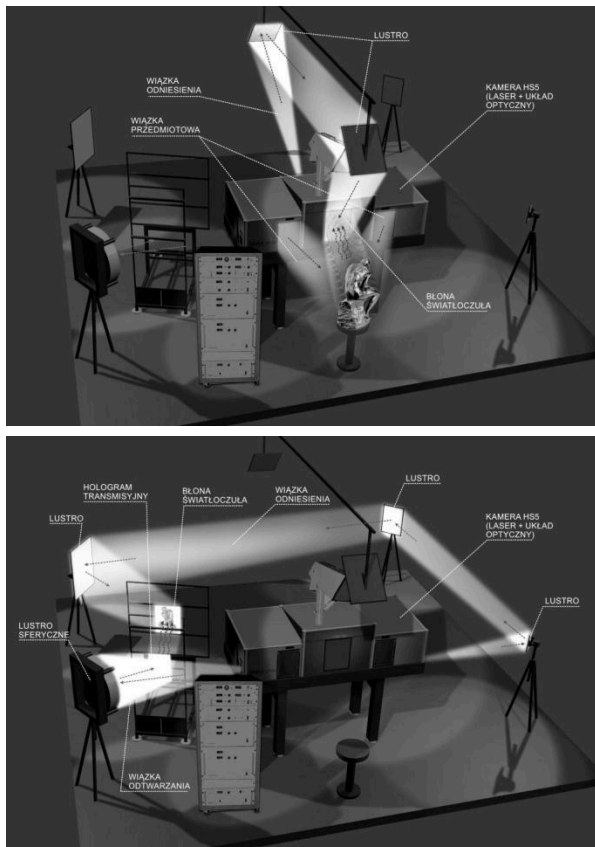
Planując końcową prezentację, trzeba brać pod uwagę trudne warunki ekspozycji, czyli konieczność użycia odrębnego światła odtwarzania dla każdego hologramu. Może to znacznie ograniczać możliwości, ale może się też okazać wartością dodaną, wnoszącą istotny element do realizowanej pracy.

Efektom wielu lat działania pracowni są niezliczone studenckie realizacje oraz dzieła sztuki, w których hologram odgrywa dominującą rolę. Te realizacje są efektem poszukiwań nowych, niesztampowych rozwiązań wykorzystujących hologram w oryginalny sposób jako środek wyrazu zarówno ciekawy, jak i adekwatny do

projektowanych koncepcji. Aktywność twórcza studentów przyczynia się do popularyzacji holografii, rzadkiej dziedziny artystycznej, a ich realizacje są ciekawymi przykładami kreatywnego i rozwojowego wykorzystania tej techniki.



Ryc. 27–30. Laboratorium holograficzne Uniwersytetu Artystycznego im. Magdaleny Abakanowicz w Poznaniu.



Ryc. 31–32. Schemat naświetlania hologramu transmisyjnego oraz światła białego w Laboratorium holograficznym Uniwersytetu Artystycznego im. Magdaleny Abakanowicz w Poznaniu.

### Holografia artystyczna

Z nielicznymi wyjątkami obrazy holograficzne zwykle kojarzy się z pewną formą fotografii przestrzennej stosowanej do utrwalania obiektów lub sytuacji. W procesie powstawania takich hologramów akt twórczy ogranicza się do podjęcia kilku niezbędnych decyzji dotyczących m.in. wyboru holografowanego motywu, układu kompozycji czy ustawienia wiązki obiektowej, od której zależy oświetlenie utrwalonej sytuacji. Dalsze czynności związane z technicznym procesem rejestracji hologramu z reguły nie wpływają już bezpośrednio na jego przedstawienie (wyjątkiem może być zmiana ostatecznej barwy odtwarzanego hologramu). Ostatnią decyzją jest dobranie formy ekspozycji. Najczęściej wieszka się na ścianie oprawiony w ramę hologram, który zostaje oświetlony białym światłem odtwarzania.

Pisząc o holografii artystycznej, mam jednak na myśli pojęcie znacznie wykraczające poza powyższy przykład — skalą oczekiwań zarówno odbiorcy, jak i twórcy.

Już w pierwszych latach istnienia holografii rozgorzał spór, czy jest ona w istocie nauką, czy sztuką. Początkowo znaczna część środowisk artystycznych nie uważała holografii za środek komunikacji wizualnej, który można by wykorzystywać w sztuce. Przesądziły o tym aspekty techniczne i złożoność procesu wykonywania hologramów, w znacznym stopniu ograniczająca swobodę artystycznej kreacji. Z czasem jednak w środowisku naukowym zrodziła się chęć propagowania holografii właśnie wśród

artystów, nadzieję na jej przyszły rozwój pokładano bowiem w pozanaukowym obszarze zastosowań.

Osobiście jestem zwolennikiem łączenia tych dwóch dziedzin, w szczególności na polu edukacji, wychodzę bowiem z założenia, że nauka i sztuka mogą się uzupełniać i korzystnie wpływać na dydaktykę, czego przykładem jest działalność Pracowni Obrazowania Przestrzennego.

Stefan Wojnecki, znany polski fotograf i teoretyk fotografii, pisał następująco: „Ażeby jakiś rodzaj twórczości uznany został za dyscyplinę artystyczną, posiadać musi właściwe mu, charakterystyczne dla niego środki wyrazu artystycznego. Nazywamy je autonomicznymi środkami wyrazu artystycznego”<sup>1</sup>. Stwierdził to wprawdzie w kontekście wypowiedzi o fotografii, starszej siostry holografii, ale z racji tego pokrewieństwa możemy te słowa odnieść również do holografii, z całą pewnością spełniającej przedstawione kryterium. Dziś holografia ma już prawie pięćdziesięcioletnią historię i ugruntowaną pozycję, choć jest bardzo młodą dyscypliną artystyczną. Pozostaje dyscypliną niszową, ale wierzę, że powstawanie i rozwój placówek takich jak nasze laboratorium holograficzne przyczynia się do jej dalszego rozwoju i u powszechnienia w szczególności na płaszczyźnie sztuki.

Należy pamiętać, że holografia jest tylko narzędziem w rękach artysty, od którego ostatecznie zależy, jak zostanie wykorzystana. Osobiście jestem zdania, że twórcze podejście do realizacji dzieł z użyciem holografii oznacza konieczność ciągłych poszukiwań nowych metod wykorzystania hologramu i prowadzenia licznych eksperymentów na wszystkich etapach pracy z nim — podczas przygotowania sytuacji, realizacji naświetlenia i planowania końcowej prezentacji.

### **Analiza wybranych realizacji artystycznych pod kątem metod i użytych środków plastycznych**

Większość poniższych przykładów to realizacje studenckie powstałe w ramach zajęć prowadzonych w Pracowni Obrazowania Przestrzennego UAP oraz indywidualne realizacje autora tego tekstu. Przykłady dobrano tak, aby zilustrować różne metody użycia hologramu w realizacjach artystycznych oraz wykorzystania jego cech mających kluczowy wpływ na jego odbiór. Aspekt artystyczny ma tu znaczenie drugorzędne.

#### **1. Światło odtwarzania (metody odtwarzania hologramów światła białego i tęczy)**

Konieczność stosowania światła odtwarzania można uważać za wadę holografii, w znacznym stopniu utrudniającą ekspozycję hologramu. Trzeba bowiem użyć zewnętrznego źródła światła, które decyduje o czytelności odtwarzanego hologramu (w szczególności dotyczy to hologramów większych, wymagających znacznej odległości źródła światła odtwarzania od hologramu w celu zachowania jak najmniejszego kąta rozproszenia wiązki). W poniższych przykładach konieczność użycia światła odtwarzania wykorzystano jako atut i kluczowy element realizowanej pracy.

---

1

Stefan Wojnecki, *Moja teoria fotografii*, Uniwersytet Artystyczny w Poznaniu, Poznań 1999, s. 16.

1.1. Światło odtwarzania statyczne, hologram statyczny



Ryc. 33–34. Małgorzata Witaszak, praca bez tytułu, 2012 r.; hologram, rama okienna, rozbite szkło; Żółte światło odtwarzania.

Głównym elementem instalacji jest oprawiony w starą drewnianą ramę okienną

przezroczysty hologram światła białego przedstawiający rzeźbę kobiety wypatrującej przez okno. Ustawiona na ziemi kompozycja sprawia wrażenie przypadkowego nieładu. Światło odtwarzania pada na instalację pionowo, a hologram jest odchylony od pionu pod kątem ok. 34°, aby odtwarzany obraz ujawniał się, tylko gdy widz znajdzie się przed nim w ściśle określonym miejscu. Głównym założeniem pracy jest wykorzystanie efektu zaskoczenia. Hologram oglądany pod kątem uniemożliwiającym projekcję sprawia wrażenie niczym niewyróżniającej się brudnej, lekko przydymionej szyby. Dopiero po wejściu w zakres projekcji uczestnik wystawy może ją postrzegać w pełni.





Ryc. 35. Karolina Machnicka, praca bez tytułu, 2012 r.; hologram, rama stalowa, mosiądz; żółte światło odtwarzania.

Realizacja przedstawia odlaną z mosiądzu uproszczoną rzeźbę ptaka „wpatrującego się” we własne odbicie holograficzne. Koncepcja polega na zestawieniu rzeczywistego obiektu (mosiężnej rzeźby) z odtwarzanym przez hologram obiektem iluzorycznym. Jest przykładem wykorzystania hologramu jako elementu złożonej instalacji, połączenia różnych dyscyplin artystycznych (rzeźby i holografii), które w tej konfiguracji doskonale się uzupełniają.



## 1.2. Światło odtwarzania w ruchu, hologram statyczny



Ryc. 36–37. Jarosław Bogucki, *Akwarium*, 2010 r.; hologram, stal, system oświetlenia; zielone światło odtwarzania.

To instalacja rzeźbiarsko-holograficzna, w której głównym elementem są osadzone w stalowej ramie hologramy światła białego o kształtach nieregularnych figur geometrycznych. Hologramy przedstawiają wykonaną ze stali rzeźbę ryby z rodziny matronicowatych.

W instalacji wykorzystano cechy hologramu stanowiące jego poważne ograniczenie, mianowicie właściwości wynikające z wymagającej formy ekspozycji, w której obraz ukazuje się w ściśle określonych warunkach oświetlenia. W tej realizacji światło odtwarzania jest integralnym elementem całości, gdyż bezpośrednio angażuje widza w proces odtwarzania hologramów, „scalając” jego osobę z systemem oświetlenia. Uczestnicy wystawy otrzymali odpowiednio przygotowane hełmy ze zintegrowanym źródłem światła przypominającym bioluminescencyjne wabiki holografowanych ryb. Zabieg ten sprawił, że obraz wyłaniający się z hologramu zależał od lokalizacji odbiorcy, gdyż decydował o nim kąt, pod jakim uczestnik wystawy oglądał odtwarzany obraz. Odbiorca stawał się wskutek tego integralną i nieodzowną częścią pracy.

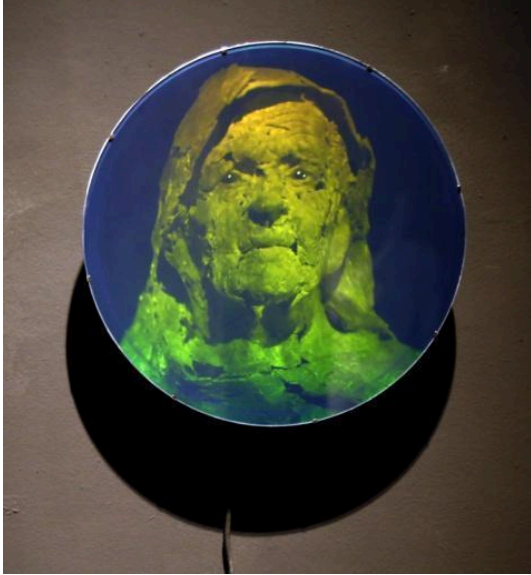
## 1.3. Światło odtwarzania statyczne, hologram w ruchu



Ryc. 38. Jarosław Bogucki, *Między iluzją a rzeczywistością*, 2011 r.; hologram, stal, żywica syntetyczna, silnik elektryczny; Żółte światło odtwarzania.

Praca składa się z rzeźby i hologramów. Rzeźba przedstawia grupę postaci naturalnej wielkości, celowo ukazanych schematycznie. To wizerunki kobiety, mężczyzny i dziecka — realistyczne, choć pozbawione detali, ponadto bez głów. Grupę otacza wisząca ruchoma obręcz z przymocowanymi hologramami, na których przedstawiono osoby różnej płci i w różnym wieku — kobietę, dziecko, mężczyznę w sile wieku i starca. Kluczowe dla całości kompozycji światło pada tylko z jednej strony, oświetlając frontalnie grupę rzeźbiarską, reszta pracy tonie w mroku. Skoncentrowana wiązka światła pozwala również wydobyć wizerunki umieszczone na hologramach, które ukazują się kolejno tylko przez chwilę — podczas ruchu obręczy, gdy światło pada na dany hologram.





Ryc. 39–40. Jarosław Bogucki, *Koło*, 2016 r.; hologram, stal, żywica syntetyczna, silnik elektryczny; białe światło odtwarzania.

Hologram przedstawia sześć różnych portretów rzeźbiarskich ujawniających się kolejno podczas obrotu. Każdy obraz zostaje odtworzony na chwilę, gdy obracający się hologram znajdzie się pod odpowiednim kątem względem wiązki światła odtwarzania rzuconej przez statyczne źródło. Cechą szczególną tego hologramu jest proces naświetlania hologramu światła białego wykonanego z sześciu różnych hologramów transmisyjnych. Podczas naświetlania hologram światła białego obracano o  $60^\circ$  względem kolejnego użytego hologramu transmisyjnego.

## **2. Barwa światła odtwarzania (odtworzenie hologramów światła białego).**

Hologramy światła białego najczęściej odtwarza się za pomocą światła białego, złożonego z fal elektromagnetycznych różnej długości. Hologram monochromatyczny warto odtwarzać, wyodrębniając z widma światła białego fale z przedziału długości umożliwiających odtworzenie (np. hologram zielony warto odtwarzać za pomocą światła o tej samej barwie). Korzyść z zastosowania właściwej barwy światła, dostosowanej do danego hologramu, polega szczególnie na zwiększeniu kontrastu i ograniczeniu ilości światła o barwie działającej niekorzystnie. Zastosowanie tego rozwiązania sprawdza się szczególnie w pewnych złożonych projektach, w których hologram należy do większej kompozycji przestrzennej, a światło odtwarzania jednocześnie odpowiada za właściwe oświetlenie sytuacji. Większość prezentowanych tutaj przykładów (z dwoma wyjątkami) odtwarza się właśnie za pomocą światła monochromatycznego.

## **3. Odtwarzanie światłem o zmiennej barwie (hologramy tęczowe oraz barwione hologramy światła białego).**

### **3.1. Hologram tęczowy oświetlany zmiennym światłem**



Ryc. 41–42. Joanna Sapkowska, *Little Pony*, 2013 r.; hologram tęczy, zabawka; wielobarwne światło odtwarzania.

Realizacja przedstawia hologram graniastego tunelu z nawiązaniem do wiru uzyskanym przez obrót kolejnych segmentów w stosunku do poprzednich. W tunelu umieszczono



gotowy obiekt, zabawkę marki Little Pony. Do prezentacji użyto światła odtwarzania płynnie przechodzącego od jednej barwy do kolejnej w pełnym zakresie barw prostych. Przy wykorzystaniu zmiennej barwy światła do odtwarzania hologramu poszczególne partie obrazu ujawniały się, a inne zanikały w poziomych pasach charakterystycznych dla hologramu tęczowego.

### 3.2. Częściowo barwiony hologram światła białego odtwarzany światłem o zmiennej barwie

Efekt podobny do uzyskiwanego w przypadku hologramu tęczowego otrzymamy, odtwarzając fragmentarycznie barwiony hologram za pomocą światła o zmieniającym się kolorze.



Białe światło odtwarzania



Zielone światło odtwarzania



Czerwone światło odtwarzania



Żółte światło odtwarzania

Ryc. 43–46. Dorota Gralewska, praca bez tytułu, 2015 r.; hologram światła białego; wielobarwne światło odtwarzania.

„W pracy dotyczącej wspomnień i pamięci posłużyłam się hologramem. Na makiecie o wymiarach zbliżonych do formatu B2 umieściłam zdjęcia, które



związane były z ważnymi zdarzeniami bądź aspektami mojego życia. Rozmieściłam je przestrzennie na rurkach różnej wysokości, aby podkreślić efekt trójwymiarowości hologramu. Wykorzystałam w pracy hologramy o różnych kolorach, a więc widzialne w różnym świetle. Część zdjęć ujrzeć można było tylko w świetle zielonym, część w czerwonym, a część w pomarańczowym. Przy eksponowaniu hologramu posłużyłam się zmiennym światłem, aby zdjęcia w określonym kolorze były widzialne tylko przez chwilę, do momentu zmiany światła na inny kolor. Niektóre zdjęcia były bliżej nas, inne dalej, niektóre w danym momencie były widoczne, inne nie, co oddało dla mnie proces przemijania i powracania pamięcią, ale i poczucie nieuchwytności. Obraz, który wydaje się mieć swój ciężar i kształt, jawi nam się jak realny, z drugiej strony jest zupełnie niedostępny naszemu dotykowi, co powoduje ciągłe uczucie możliwości obcowania z nim, a z drugiej strony — nienasyceńca.”<sup>2</sup>

#### 4. Metoda wielokrotnego naświetlania hologramu transmisyjnego



Ryc. 47. Jarosław Bogucki, *Portret podwójny*.

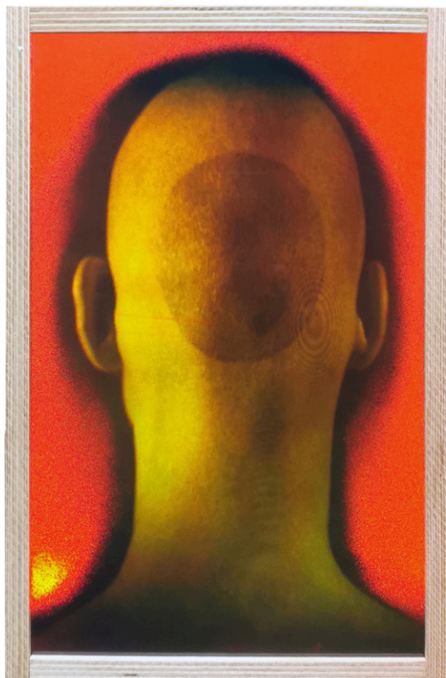
Hologram to portret dwóch osób „scalonych” w jedną. Zastosowana metoda polega na podwójnym naświetleniu hologramu transmisyjnego kolejno dwóch różnych postaci wraz ze zmianą kierunku wiązki obiektowej — raz oświetla z lewej, raz z prawej strony,

<sup>2</sup> Dorota Gralewska, komentarz do realizacji, 2018 r.

aby oświetlona została tylko jedna strona każdego modelu.

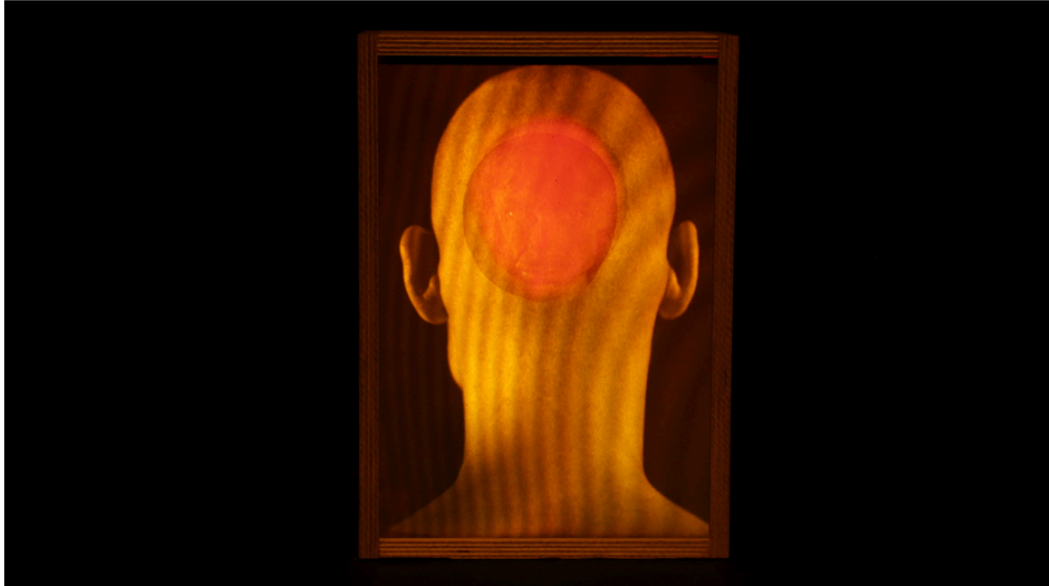
## 5. Wykorzystanie transparentności błony holograficznej





Ryc. 48–49. Szymon Zwoliński, praca bez tytułu (autoportrety holograficzne 1, 2) z serii *Wypalenie*, 2019–2020; hologram, mechanizm ruchomy, drewniana rama.

Pracę zbudowano w cyklu trójelementowym. Składa się z drewnianych ram/skrzynek, wewnątrz których umieszczono mobilny mechanizm pozwalający wywoływać wrażenie rozpalonego ognia oraz hologramy. Hologram przedstawia postać mężczyzny w ujęciu portretowym z przodu i (dwukrotnie) z tyłu. Na hologramie uchwycone zostały również cechy charakterystyczne portretowanej osoby, np. tatuaż, w którym pojawia się ponownie twarz portretowanej postaci. W obrębie wizerunku znajdują się plamy barwne przypominające naturalne przebarwienia skóry, usytuowane w górnej części czołowej oraz okalające kontur postaci. Dzięki zastosowanemu wewnątrz mechanizmowi mobilnemu na plamach żarzy się wewnętrzny ogień. Sprawia wrażenie prawdziwego, ale pozostaje złudzeniem optycznym. Hologramy ukazujące mężczyznę oświetlane były żółtym światłem.



Ryc. 50. Szymon Zwoliński, praca bez tytułu (autoportrety holograficzne 3) z serii *Wypalenie*, 2019–2020; hologram, mechanizm ruchomy, drewniana rama.

W tej pracy, również zbudowanej z trzech elementów, zastosowano te same materiały, tj. drewnianą skrzynkę z mechanizmem oraz hologram. Tym razem hologram ukazuje rzeźbę zdeformowanej twarzy męskiej, spłaszczoną i leżącą na boku. Na poziomie oczodołów całą głowę okala zbudowany z geometrycznych brył pas imitujący koronę. Ukrycie oczu postaci oraz niezidentyfikowany pas okalający rzeźbę wywołują niepokój. Złudzenie optyczne spalania, uzyskane dzięki mechanizmowi zastosowanemu wewnątrz skrzynki, powstało po oświetleniu światłem czerwonym.





Ryc. 51. Szymon Zwoliński, *Bez tytułu* (1) z serii *Nie widzę, nie mówię, nie słyszę*, 2019–2020; hologram, mechanizm ruchomy, drewniana rama.

Kolejny hologram cyklu ukazuje rzeźbę zdeformowanej męskiej twarzy, w której geometryczny pas przebiega wzdłuż linii uszu. Projekcję imitującą ogień uzyskano dzięki mechanizmowi umieszczonemu wewnątrz instalacji. Hologram został zbity. Ostatni hologram z tej serii to również rzeźbiona męska głowa; tutaj geometryzujący pas zbudowany z modułów znajduje się w linii ust.



Ryc. 52–53. Szymon Zwoliński, *Bez tytułu* (2, 3) z serii *Nie widzę, nie mówię, nie słyszę*, 2019–2020; hologram, mechanizm ruchomy, drewniana rama.

### **Uwagi końcowe**

Holografia oferuje bardzo wiele twórczych możliwości. Należy sobie zdawać sprawę, jak dużo możemy dzięki niej zyskać, a jak mało o niej wiemy. Potencjał tej dyscypliny jest ogromny, o czym przekonuję się nieustannie, znajdując dla niej nowe zastosowania. Przedstawione powyżej przykłady są tylko skromną częścią możliwości użycia hologramu w realizacjach artystycznych wykraczających poza metody tradycyjne. To, jak i w jakim kontekście zostanie wykorzystany hologram, zależy od kreatywności i potencjału twórczego artysty.

Warto zwrócić uwagę na odbiorcę artystycznych realizacji holograficznych. Intensywność kontaktu widza z realizacjami artystycznymi wykorzystującymi hologram często zostaje spotęgowana przez element zaskoczenia wynikający z nieznamomości holografii i zafascynowania pierwszym zetknięciem się z tą techniką. Można to niekiedy wykorzystać przy planowaniu realizacji i odpowiedniej ekspozycji, nadając pracom pewien aspekt magiczny. Niestety, niejednokrotnie zdarza się tak, że niezwykła i zaskakująca dla przeciętnego odbiorcy forma hologramu uniemożliwia przebicie się przez wierzchnią warstwę dzieła, które pozwoliłoby dojść do analizy i głębszej interpretacji. Skupiając się jedynie na zewnętrznej, formalnej stronie obrazu, widz uważa hologram za ciekawostkę i nie podejmuje wysiłku odczytania zamierzeń artysty. Oglądane realizacje pozbawia tym samym rangi sztuki, sprowadzając je do obiektów pozbawionych treści, mających jedynie zaskakiwać i bawić, a nie skłaniać do refleksji.

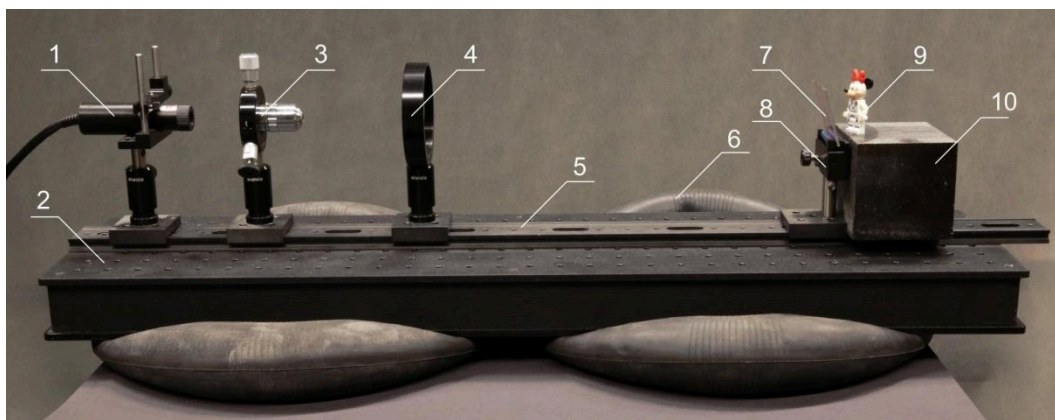
Hologram w moim wyobrażeniu jest czymś więcej jak tylko wierną kopią wycinka realnego świata. Pozwala na zatrzymanie czasu w miejscu, daje możliwość uchwycenia i utrwalenia rzeczywistości w formie zamrożonego, martwego obrazu, który możemy obserwować bez ograniczeń, gdyż pozostaje w bezruchu. W obliczu hologramu wydawać by się mogło, że posiadamy władzę nad czasem. Złudzenie to potęguje wrażenie kontaktu z odmiennym bytem podlegającym innym niż nasze prawom, oknem do innego wymiaru, świata pozbawionego wielości barw, monochromatycznego, ale jednocześnie zdeterminowanego przez jeden, intensywny kolor potęgujący nastrój nierealności. Szczególnie ta właściwość czyni hologram plastycznie niezwykle atrakcyjnym. Cecha ta jednak nie może być jedynym kryterium wpływającym na wybór hologramu jako artystycznego środka wyrazu. Najistotniejszym jest znaleźć takie dla niego zastosowanie, w którym hologram będzie jedyną możliwą formą przedstawienia.



## HOLOGRAMY DIENISJUKA — ZASTOSOWANIE PRAKTYCZNE

Laboratorium Holograficzne Uniwersytetu Artystycznego im. Magdaleny Abakanowicz w Poznaniu dysponuje sprzętem umożliwiającym wykonanie tzw. hologramów Dienisjuka nawet bez profesjonalnej aparatury holograficznej. Wykorzystując stosunkowo nieskomplikowany układ optyczny oraz powszechnie dostępny laser typu pointer, można wykonać niewielkie hologramy. (Szczegółowy opis hologramów Dienisjuka można znaleźć w rozdziale *Holografia*: zob. podrozdział 8, *Hologramy odbiciowe i Dienisjuka*).

### 1. Budowa przykładowego zestawu przeznaczonego do rejestracji hologramów Dienisjuka



Ryc. 54. Przykładowy zestaw do rejestracji hologramów Dienisjuka: 1. laser diodowy (typu pointer), 2. blat stołu optycznego, 3. obiektyw mikroskopowy, 4. soczewka płasko-wypukła, 5. szyna optyczna, 6. niwelator drgań (np. dętka), 7. płytka szklana z filmem holograficznym, 8. uchwyt mocujący, 9. obiekt holografowany, 10. stabilna podstawa (np. kostka granitowa).

### 2. Materiał rejestrujący: Color Photopolymer Bayfol® HX 200

Stosujemy światłoczułą folię fotopolimerową, którą można wykorzystywać do wykonania hologramów do oglądania w świetle białym (hologramów odbiciowych). Bayfol HX 200 może być używany przy wykorzystywaniu światła laserowego w widzialnym zakresie fal, tj. o długości fali od 440 nm do 680 nm. Do utworzenia hologramu nie potrzeba dodatkowej obróbki, tj. ani obróbki na mokro (czyli nie stosuje się procesu fotochemicznego), ani obróbki termicznej. Po naświetleniu hologramu konieczna jednak jest ekspozycja na światło krótkofalowe (za pomocą lamp UV lub poprzez wystawienie na światło słoneczne), aby usunąć uczulenie nienaświetlonych obszarów na światło. Bayfol HX 200 składa się z trzech warstw podłoża, światłoczułego fotopolimeru i ochronnej folii wierzchniej. Podłoże to folia z trioctanu celulozy (TAC), a osłona ochronna to folia polietylenowa (PE). Folię ochronną można usunąć z fotopolimeru. Produkt może być stosowany do różnego rodzaju hologramów objętościowych (zob. <https://www.geola.com/product/photopolymer/>)

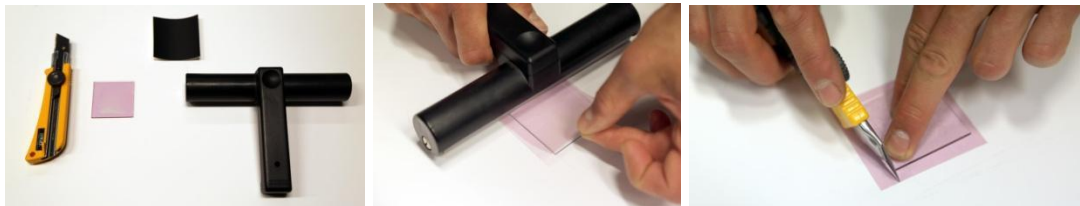
Folia fotopolimerowa jest doskonałą alternatywą dla filmów holograficznych

bazujących na halogenkach srebra, które wymagają stosunkowo skomplikowanej, „mokrej” obróbki. Dzięki fotopolimerom efekt rejestracji nie wymaga żadnych dodatkowych procesów po naświetleniu hologramu poza krótkotrwałą ekspozycją na światło ultrafioletowe. Ta właściwość sprawia, że efekt finalny uzyskujemy natychmiast po rejestracji hologramu. Dodatkowym atutem jest możliwość realizacji hologramów w trzech kolorach lub jednym z wybranych kolorów w zależności od długości fali światła lasera użytego do rejestracji — zielonym, czerwonym lub niebieskim.

### 2.1. Przygotowanie materiału do holografowania

Należy przygotować cienkie płytki szklane w docelowym formacie. Następnie trzeba usunąć folię ochronną z przyciętych kawałków folii fotopolimerowej oraz za pomocą miękkiego wałka fotograficznego nałożyć folię na szkło. Bardzo ważne jest, aby zrobić to w środowisku całkowicie wolnym od kurzu i pyłów. Powierzchnia szkła, na które naklejana jest folia polimerowa, bezwzględnie musi być czysta, pozbawiona wszelkich, nawet najdrobniejszych zanieczyszczeń, gdyż w miejscu występowania drobin hologram może się nie zarejestrować, a wówczas powstanie „dziura” w obrazie. Następnie należy odciąć nadmiar folii wystający poza krawędź szkła. Folia po nałożeniu idealnie przylega do tafli szkła. W trakcie wszystkich czynności w szczególności należy uważać na wszelkie zanieczyszczenia powodujące powstawanie pęcherzy powietrza między folią a szkłem, tam bowiem obraz nie zostanie zarejestrowany.

Ze względu na wrażliwość folii na światło wszystkie czynności należy wykonać w warunkach ciemniowych, a zalaminowane płytki zabezpieczyć przed dostępem światła. Dopuszcza się nikłe oświetlenie ciemni źródłem promieniowania długofalowego (ciemnoczerwona lampa) o jak najniższej intensywności.



Ryc. 55–57. Przygotowanie materiałów. Od lewej: zestaw podstawowych narzędzi, proces nakładania arkusza materiału fotopolimerowego na podłoże szklane, przycinanie nadmiaru folii do pożądanego wymiaru.

### 3. Proces rejestracji hologramów

Najważniejszym wymogiem jest maksymalna stabilizacja aparatury. Jedynym sposobem zniwelowania drgań jest wykorzystanie jako podstawy materiału, który skutecznie pochłania wszelkie mikrowstrząsy. W naszym przypadku — jako najprostsza i sprawdzona metoda — używane są częściowo wypełnione powietrzem dętki, na których umieszcza się blat z układem rejestracji hologramów. Mimo zastosowania metody redukcji drgań, należy zadbać, aby rejestracji dokonywać w miejscach spokojnych, z dala od wstrząsów i wibracji mogących pochodzić od obiektów przemysłowych, ruchu ulicznego, a nawet urządzeń gospodarczych i narzędzi mechanicznych. Niezachowanie tych wymogów uniemożliwi prawidłową rejestrację hologramu. Podobnie jak przy obróbce materiałów

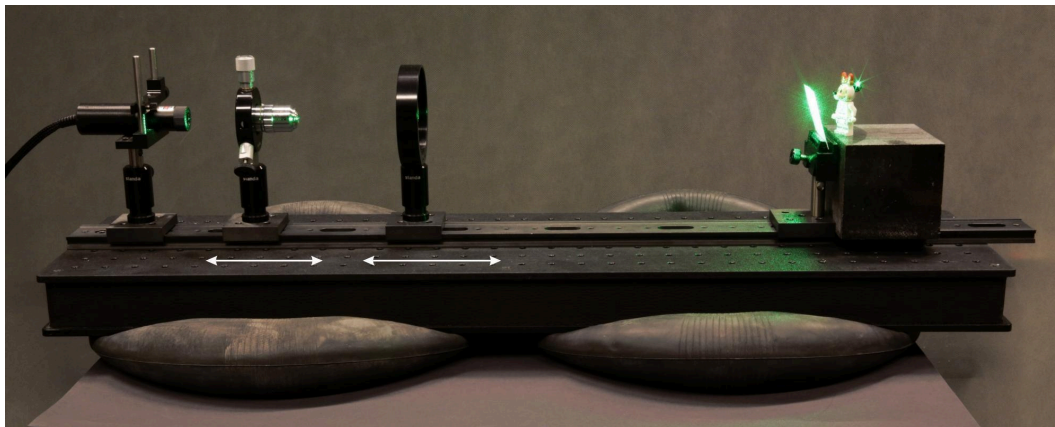
fotograficznych, ze względu na światłoczułość materiałów holograficznych wszystkie czynności związane z przygotowaniem folii fotopolimerowej do czasu naświetlania należy prowadzić przy ograniczonym dostępie światła (warunki ciemniowe).

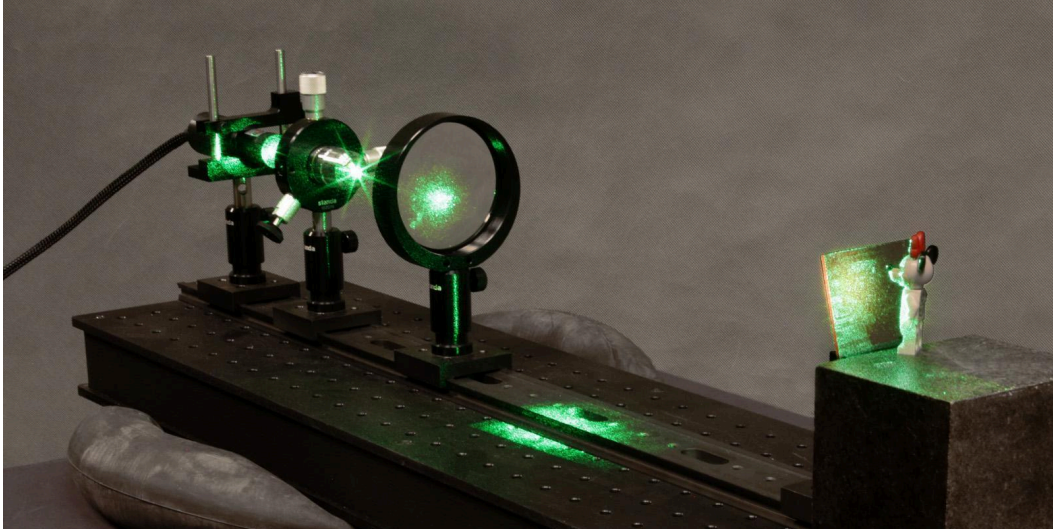
### 3.1. Przygotowanie sceny

Na stabilnym podłożu należy umieścić holografowany obiekt w jak najmniejszej odległości od folii fotopolimerowej (wskazane jest, aby obiekt nawet dotykał powierzchni materiału rejestrującego). Holografowane obiekty powinny być wykonane z materiałów gwarantujących stabilną pozycję. Najlepiej nadają się do tego obiekty dość masywne, ciężkie. Gdy wykorzystuje się przedmioty lżejsze, warto je solidnie przymocować do podstawy. Aby uzyskać jak najlepszą wydajność rekonstrukcji obrazu, obiekty powinny także być jak najjaśniejsze. Pamiętać bowiem należy, że obiekty i fragmenty obiektów o niskim współczynniku odbicia, czyli ciemne, będą słabiej widoczne na hologramie.

### 3.2. Korekta wiązki światła laserowego

Umieszczając biały ekran wycięty z papieru w docelowym formacie hologramu, w uchwycie przeznaczonym na płytkę z folią fotopolimerową, można ustawić właściwą pozycję wiązki. Regulując pozycję obiektywu mikroskopowego oraz soczewki płasko-wypukłej, możemy dobrać stopień rozproszenia oraz wyśrodkować wiązkę laserową w osi hologramu. W praktyce należy zadbać o jak najlepsze i najbardziej równomierne oświetlenie materiału holograficznego.





Ryc. 58–59. Centrowanie wiązki laserowej w osi hologramu.

### 3.3. Umieszczenie płytki szklanej z folią fotopolimerową w uchwycie

W miejscu papierowego ekranu umieszczamy szklaną płytkę z folią fotopolimerową, stroną z folią skierowaną do holografowanego obiektu.

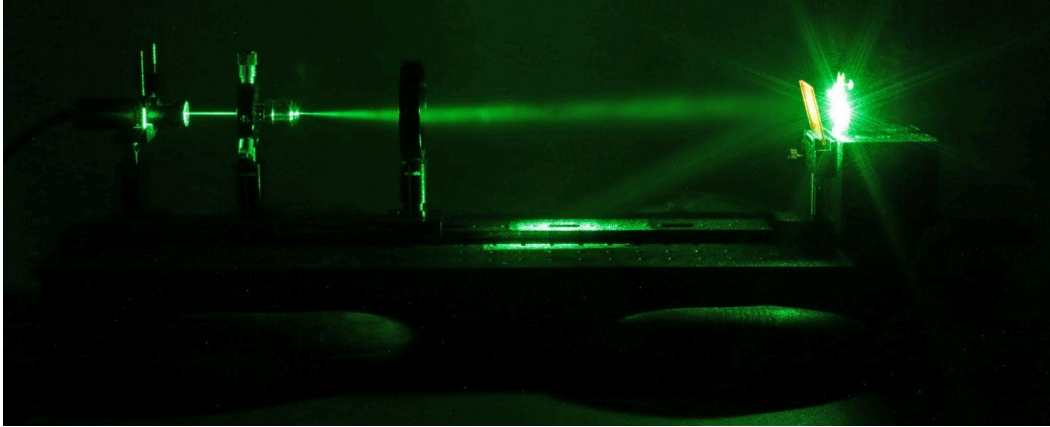


Ryc. 60. Układ do zapisu hologramu.

### 3.4. Naświetlanie hologramu

Ze względu na stabilność wiązki czas naświetlania nie powinien przekraczać kilku, kilkunastu sekund. Należy go dobrać eksperymentalnie. Podczas zajęć praktycznych wskazówek co do czasu ekspozycji udzieli prowadzący.

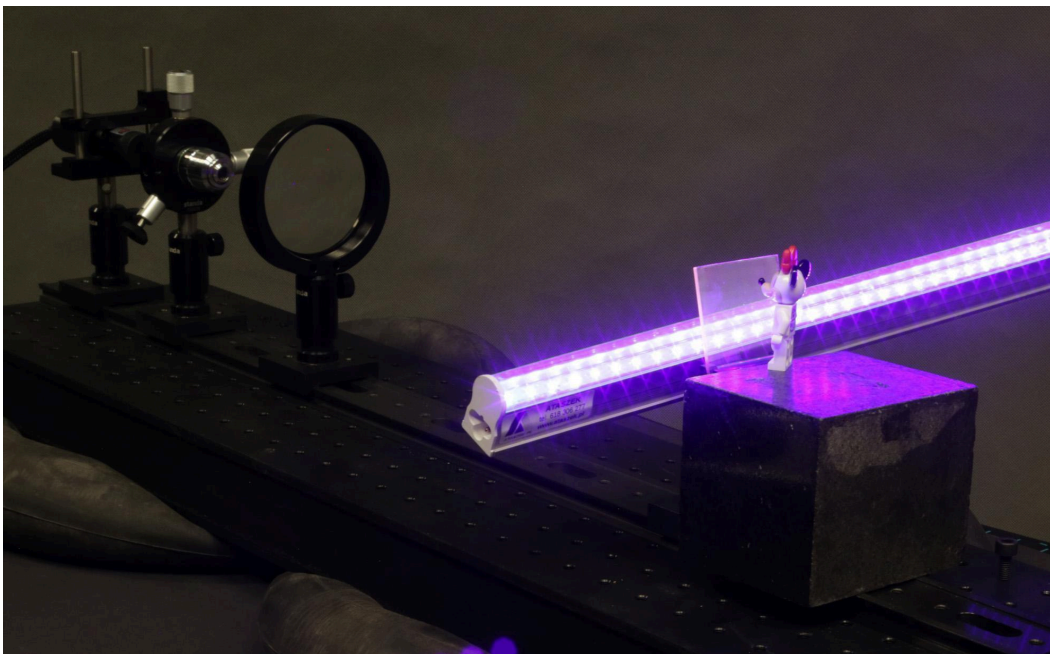




Ryc. 61. Ekspozycja.

### 3.5. Utrwalanie hologramu

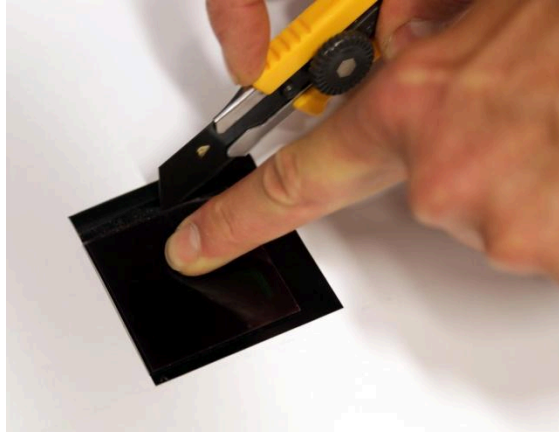
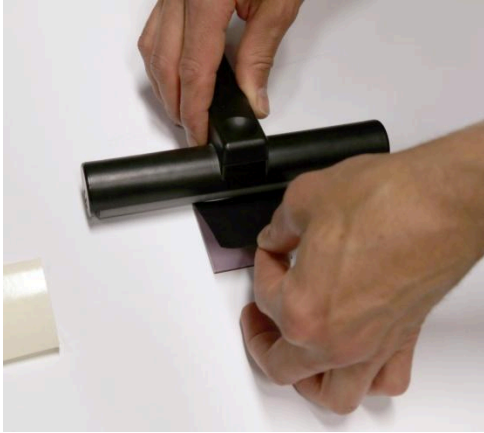
Obraz zarejestrowany na folii fotopolimerowej utrwalamy poprzez krótką ekspozycję na światło UV lub wystawiając na światło słoneczne.



Ryc. 62. Utrwalanie hologramu.

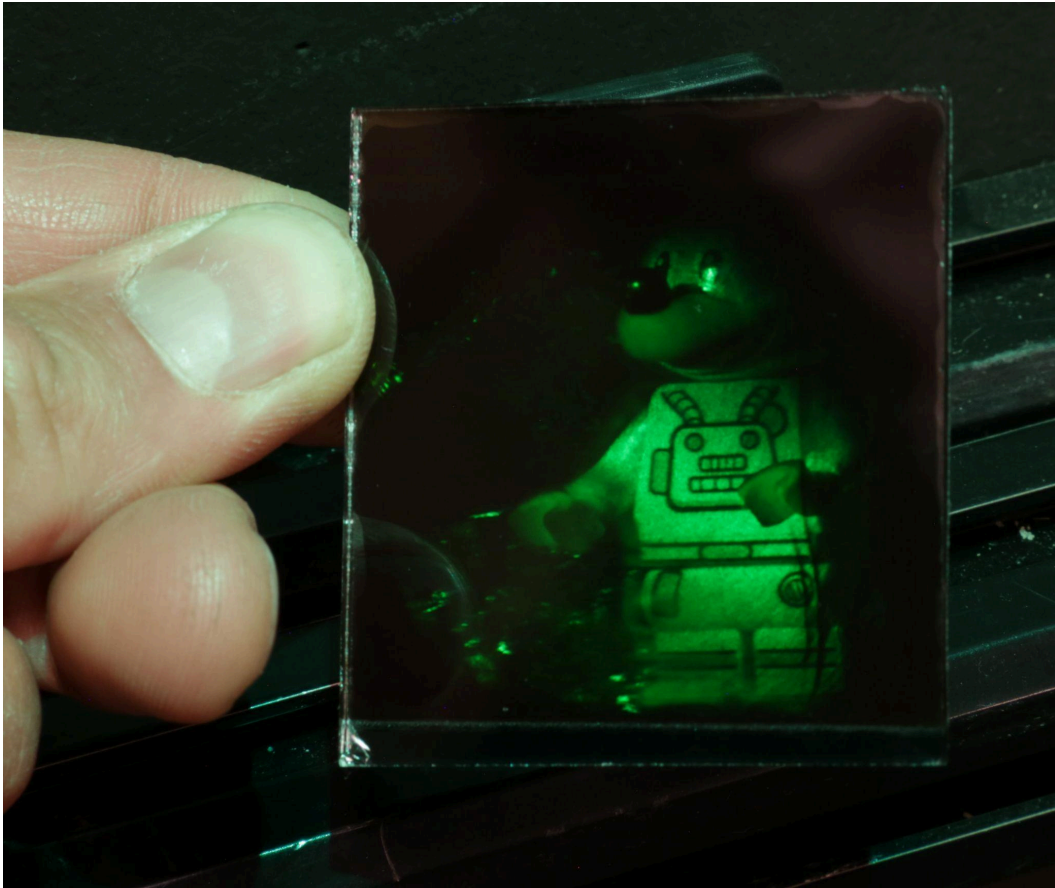
### 3.6. Zabezpieczenie hologramu

Folia fotopolimerowa jest podatna na zabrudzenia oraz uszkodzenia. Praktycznym rozwiązaniem jest wykorzystanie jako zabezpieczenia — a także jako tła dla hologramu — czarnej folii ploterowej. Należy ją nakleić równo i bez zanieczyszczeń na stronę płytki szklanej z materiałem fotopolimerowym. Folię tę nakleja się podobnie jak folię fotopolimerową na szkło.



Ryc. 63–64. Zabezpieczenie hologramu.

**3.7. Przykładowy hologram**  
Czas naświetlania: 6 sekund.







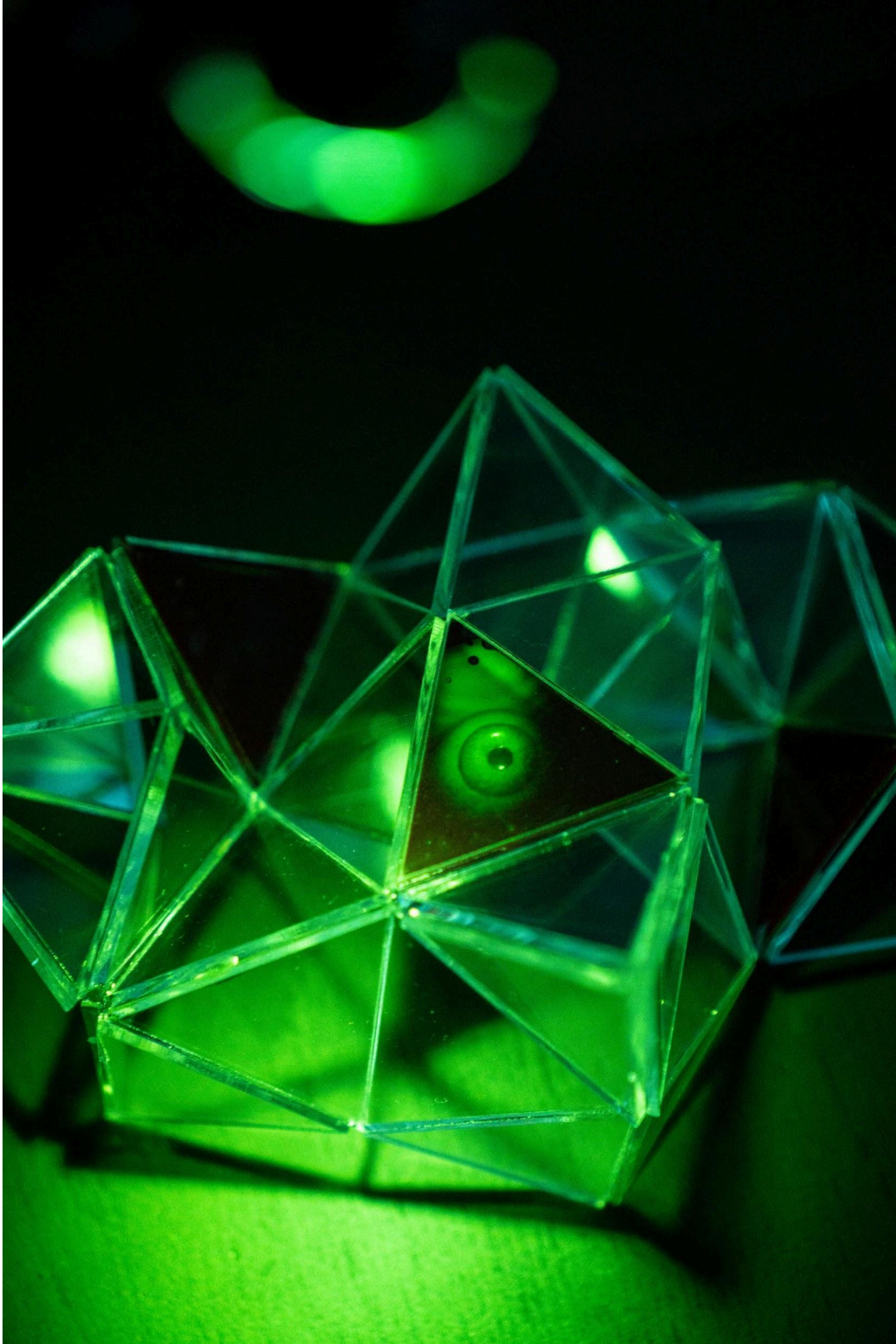
Ryc. 65–66. Przykładowy hologram.

### *3.8. Odtwarzanie hologramu*

Hologram zarejestrowany w prezentowanym układzie jest przygotowany do odtwarzania w świetle białym, niekoherentnym. Przede wszystkim należy zadbać, aby oświetlenie do rekonstrukcji było jak najbardziej zbliżone do punktowego. Najlepiej nadaje się do tego światło słoneczne, ale dobrze sprawdzają się też pojedyncze diody LED (białe) umieszczone jak najdalej od hologramu. Źródła rozciągłe, takie jak duże płaszczyzny świecące, żarówki z dużą bańką lub modułowe, wielozłączowe lampy LED dawać będą obraz rozmyty lub zwielokrotniony. Pamiętać należy, że nie jest to wadą hologramu, lecz jedynie skutkiem nieodpowiedniej metody rekonstrukcji (zob. rozdział 8).

## **4. Wykorzystanie hologramów Dienisjuka w realizacjach artystycznych na wybranych przykładach**

### **4.1. Multiplikacje hologramu**



Ryc. 67. Olga Kucel, *Artifacts*, 2023 r.; szkło akrylowe, hologram.

To obiekt przestrzenny wykonany z trójkątnych płytek transparentnego szkła akrylowego. Na elementach pracy umieszczono hologramy przedstawiające sztuczną gałkę oczną. Realizacja jest przykładem wykorzystania powielonego hologramu jako elementu całości kompozycji przestrzennej. Poprzez umieszczenie hologramów w poszczególnych elementach geometrycznej struktury wrażenie przestrzenności bryły dodatkowo spotęgowano dzięki trójwymiarowości, głębi holograficznego obrazu. Ważnym elementem pracy jest zderzenie surowej, ostrej formy przezroczystego obiektu z przedstawieniem wpatrzonych w przestrzeń, budzących niepokój oczu.

#### 4.2. Realizacje interdyscyplinarne

Umiejętnie wykorzystany obraz holograficzny dobrze komponuje się w realizacjach z różnych dziedzin artystycznych. Należy jednak pamiętać, że pomimo trójwymiarowej głębi hologram jest przedmiotem dwuwymiarowym.







Ryc. 68–69. Jakub Matuszewicz, *Autoportret*, 2023 r.; dyptyk: olej na płótnie, podobrazie, hologram 5×5 cm.

Umieszczony w centralnym punkcie podobrazia hologram przedstawia kciuk trzymający paletę malarską w sposób charakterystyczny dla artysty. W malowanej części obrazu przedstawiono fragment palety oraz dłoń mieszającą pędzlem farby.





Ryc. 70–71. Jakub Matuszewicz, *Autoportret*, 2023 r.; dyptyk: olej na płótnie, podobrazie z zawiasem, hologram 5×5 cm.

Realizację wykonano w tradycyjnych technikach malarskich w połączeniu z hologramem umieszczonym w centralnym punkcie kompozycji. Hologram przedstawia końcówkę pędzla, podstawowego narzędzia malarskiego. Hologram stanowi dopełnienie obrazu przedstawiającego autora uchwyconego podczas gruntowania płótna.

„W obrazach, których głównym tematem jest wizerunek malarza (mój autoportret), poruszam problem obecności przedmiotu lub osoby. Chcąc namalować realistyczny autoportret, musimy posłużyć się lustrem, autor musi być przed obrazem. Aby wykonać fotografię, musimy mieć model przed obiektywem, a żeby wykonać hologram, potrzebujemy przedmiotów tuż za błoną holograficzną. Za każdym razem potrzebne są dwie rzeczy: szkło (lustra obiektywu, szyba, na której jest hologram) oraz obecność. Zestawienie hologramu, który jest ruchomym obrazem, z malarstwem opartym o fotografię, tworzy relacje dość specyficzną. W obu przypadkach mamy do czynienia z imitacją: albo hologramu, albo przestrzeni »pudełka, w którym znajdują się konkretne przedmioty«”.

(komentarz autora)

#### **4.3. Zestawienie gotowych obiektów z przedstawieniem holograficznym**

Holografia daje możliwość rejestracji obiektów efemerycznych, podatnych na zniszczenie oraz upływ czasu. W przeszłości wykorzystywano ją do prezentowania obiektów muzealnych, których stan uniemożliwiał ekspozycję w oryginale. Wizerunek utrwalony na kliszy holograficznej jest dokładnym odwzorowaniem realnego wzorca, z tym że bez formy fizycznej. To jego zatrzymana w czasie wizualna kopia.



Ryc. 72–73. Magdalena Czapiewska, bez tytułu, 2023 r.; pień drzewa, hologram 5×5 cm.

„Obiekt to połączenie świata naturalnego i technologii. Martwy pień ożywa przez dodanie do niego hologramów, które sprawiają wrażenie ruchu i życia pod korą. Hologramy przedstawiają obiekty znalezione w lesie — porosty i rośliny przypominające kokony. Mimo że struktury przedstawione na hologramach w naturze znajdują się na korze lub tylko oplatają drzewa, w obiekcie »bez tytułu (pień)« sprawiają wrażenie, jakby przynależały do wewnętrznych warstw drzewa”.

(komentarz autorki)

#### **4.4. Wykorzystanie hologramów Dienisjuka w obiektach o funkcji edukacyjnej**

Jedno z nietuzinkowych zastosowań dla hologramów Dienisjuka znalazł w roku akademickim 2022/23 student Rafael Alejandro Muñoz Osorio, który w ramach pracy magisterskiej poświęconej poprawie umiejętności wzrokowo-przestrzennych i wzroście dobrostanu dzieci z ADHD zbudował obiekt edukacyjny z zastosowaniem hologramów tego typu.





Ryc. 74–76. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, *ADHD and Holographic Intervention*, 2022–23; hologram Dienisjuka, drewno, farba.

Jak zauważa Rafael Alejandro Muñoz Osorio w swojej pracy magisterskiej: „Zmysł wzrokowo-przestrzenny to aspekt fundamentalny przetwarzania poznawczego i może odgrywać kluczową rolę w zrozumieniu i zarządzaniu uwagą u dzieci ze zdiagnozowanym zespołem nadpobudliwości psychoruchowej z deficytem koncentracji (ADHD). Hologramy oferują wciągające i interaktywne wrażenia wizualne, zapewniając widzom możliwość postrzegać obrazy pod różnymi kątami; w ten sposób stymulują zmysł wzrokowo-przestrzenny w wyjątkowy i wciągający sposób”<sup>3</sup>.



Ryc. 77. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, *ADHD and Holographic Intervention*, 2022–23; hologram Dienisjuka, drewno, farba.

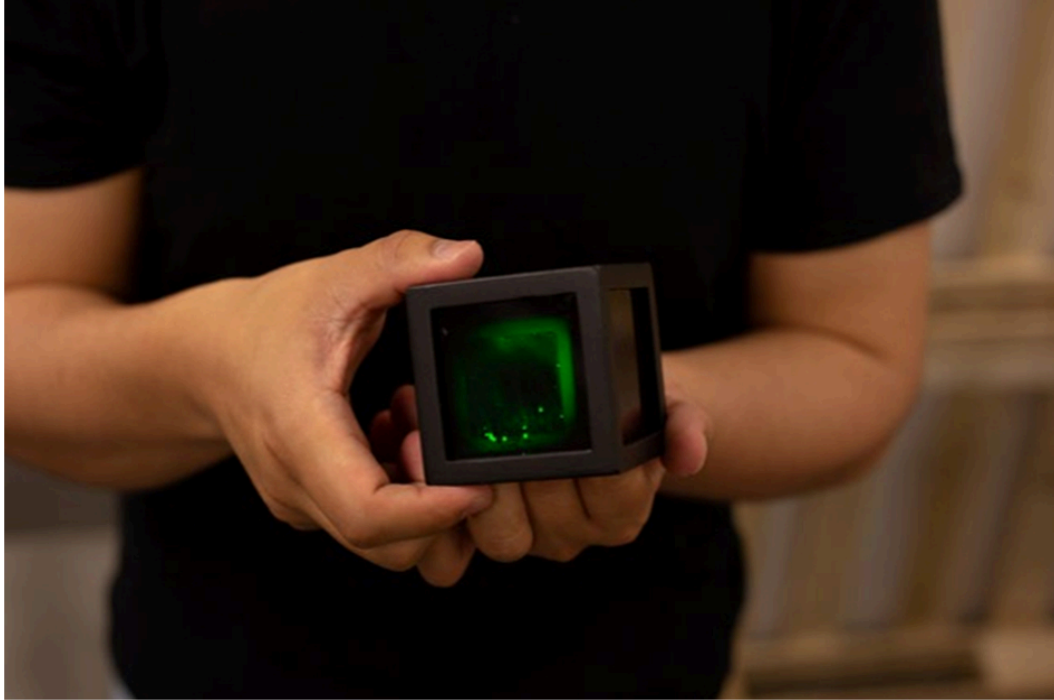
<sup>3</sup> R. Alejandro Muñoz Ostrio, *ADHD and Holographic Intervention: Enhancing Visual-Spatial Skills and Overall Being of Children with ADHD* (praca magisterska), s. 7.

Obiekt zawiera aż cztery hologramy Dienisjuka. Podczas interakcji użytkownik analizuje je indywidualnie, korzystając z urzekającego wrażenia wizualnego uzyskiwanego jedynie dzięki hologramom. Dodatkowym atutem obiektu jest możliwość wprawiania go w ruch w tempie dobranym przez osobę użytkującą. Dzięki temu następuje stymulacja uwagi, zwiększenie wrażliwości zmysłu wzrokowo-przestrzennego i potencjalne złagodzenie niektórych z długoterminowych skutków poznawczych ADHD.



Ryc. 78–79. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, *ADHD and Holographic Intervention*, 2022–2023; hologram Dienisjuka, drewno (widok przed pomalowaniem).

Pochodzący z Gwatemali, a studiujący w Niemczech Rafael Alejandro Muñoz Ostrio zdecydował się na stworzenie tego typu obiektu, ponieważ podczas studiów licencjackich podjął wolontariat na rzecz osób z doświadczeniem uchodźczym, wśród których również spotkał dzieci z ADHD. Zainteresowało go, jak pięknie się różnimy i jak pracą twórczą można poprawić funkcjonowanie innych ludzi.



Ryc. 80. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, *ADHD and Holographic Intervention*, 2022–2023; hologram Dienisjuka, drewno, farba (obiekt edukacyjny w rękach autora).

## SŁOWNICZEK POJĘĆ UŻYTYCH W TEKŚCIE

**holograficzny zapis w układzie osiowym** — dwie wiązki światła (referencyjna i obiektowa) są emitowane z tego samego punktu

**holograficzny zapis w układzie pozaosiowym** — dwie wiązki światła (referencyjna i obiektowa) są emitowane z różnych punktów

**hologram objętościowy** — potocznie zwany grubym, o grubej warstwie materiału światłoczułego

**hologram tęczy** — nazwa pochodzi od zmieniającej się barwy hologramu w zależności od kąta obserwacji; odtwarzany jest za pomocą światła białego

**koherencja światła** — zachowanie stałej różnicy faz podczas rozchodzenia się światła

**laser o emisji ciągłej** — laser nieprzerwanie emitujący światło

**laser impulsowy** — laser emitujący światło przez bardzo krótki czas (rzędu nanosekund)

**paralaksa** — możliwość oglądania hologramu z różnych punktów; paralaksa pionowa — możliwość oglądania go z różnych punktów położonych wyżej lub niżej względem niego; paralaksa pozioma to podobna właściwość w poziomie

**propagacja fali** — rozprzestrzenianie się fali podczas emisji

## WYKAZ I ŹRÓDŁA ILUSTRACJI

- Ryc. 1. Projekcja obrazu holograficznego użyta w filmie *Gwiezdne wojny: część IV – Nowa nadzieja* (<https://www.starwars.com/news/6-ways-holograms-play-an-important-role-in-star-wars>; dostęp 18.08.2023 r.).
- Ryc. 2. Metoda projekcji świetlnej tworząca w przestrzeni obraz pojazdu z filmu Star Wars. W tym przypadku wykorzystano wirujące zwierciadło i projekcję światła niekoherentnego (<https://www.wired.com/2008/06/usc-lab-creates/>; dostęp 18.08.2023 r.).
- Ryc. 3. Banknot Narodowego Banku Polskiego o nominale 500 zł, w którym zastosowano zabezpieczenie holograficzne – pasek oznaczony numerem 2 (<https://nbp.pl/banknoty-i-monety/banknoty-obiegowe/500-zl/>; dostęp 18.08.2023 r.).
- Ryc. 4. Hologram zabezpieczający kartę bankową ([https://static.turbosquid.com/Preview/000293/674/U0/credit-card-hologram-3d-obj\\_D.jpg](https://static.turbosquid.com/Preview/000293/674/U0/credit-card-hologram-3d-obj_D.jpg); dostęp 18.08.2023 r.).
- Ryc. 5. Ubiór damski wykonany z materiałów korzystających ze zjawiska dyfrakcji, tzw. tkaniny holograficznej ([https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1os9cLXXXXXatXVXXq6XFXXk/Low-key-luxury-compact-fluorescent-silver-coating-knitted-fabrics-holographic-cloth-laser-Silvering-stretch-knit-fabric.jpg\\_640x640.jpg](https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1os9cLXXXXXatXVXXq6XFXXk/Low-key-luxury-compact-fluorescent-silver-coating-knitted-fabrics-holographic-cloth-laser-Silvering-stretch-knit-fabric.jpg_640x640.jpg); dostęp 18.08.2023 r.).
- Ryc. 6. Deskorolka wytworzona z zastosowaniem warstwy dyfrakcyjnej, tzw. holograficzna (<https://www.snupe.com/wp-content/uploads/2017/02/Holographic-Skateboard-3.jpg>; dostęp 18.08.2023 r.).
- Ryc. 7. Wieloekspozycyjny hologram wykonany laserem impulsowym: Margaret Benyon, *Tigirl*. Źródło: holocenter.org.
- Ryc. 8. Hologram tęczy oglądany w świetle białym. (Źródło: Massachusetts Institute of Technology).
- Ryc. 9. Jarosław Bogucki, *Narczyz*, wys. 270 cm, brąz, hologram, płyta wiórowa, stal, 2018 (fotografia z archiwum autora).
- Ryc. 10. Jarosław Bogucki, *Słowo w słowo*, 40x50 cm — hologram, 2018 (fotografia z archiwum autora).
- Ryc. 11. Szymon Zwoliński, *Bez tytułu* (autoportrety holograficzne 1, 2) z serii *Wypalenie*, 2019–2020 (fotografia z archiwum autora).
- Ryc. 12. Prof. Wencisław Sajnow demonstruje wykonany metodą Dienisjuka hologram dwóch XIX-wiecznych pistoletów używanych przez rosyjską armię (<http://www.worldsworsttourist.com/WWTBulgaria05.htm>; dostęp 18.08.2023 r.).
- Ryc. 13. Mieczysław Wolfke (zob. <https://s.ciekawostkihistoryczne.pl/uploads/2016/05/Mieczys%C5%82aw-Wolfke.jpg>; dostęp 18.08.2023 r.).
- Ryc. 14. Dennis Gabor (zob. <https://cultura.hu/wp-content/uploads/2015/06/cultura-gabor-denes-oktat.jpg>; 18.08.2023 r.).
- Ryc. 15. Emmett Leith i Juris Upatnieks (zob. <https://eecsnews.engin.umich.edu/wp-content/uploads/sites/2/2019/09/leith-2.jpg>; dostęp 18.08.2023 r.).
- Ryc. 16. Drukarka holograficzna firmy Geola (zob. [www.geola.com](http://www.geola.com); dostęp 18.08.2023 r.).
- Ryc. 27–29. Laboratorium holograficzne Uniwersytetu Artystycznego im. Magdaleny Abakanowicz w Poznaniu (fotografie z archiwów autorów).
- Ryc. 30. Laboratorium holograficzne Uniwersytetu Artystycznego im. Magdaleny Abakanowicz w Poznaniu (fot. Ewa Bielańczyk).
- Ryc. 31–32. Schemat naświetlania hologramu transmisyjnego oraz światła białego w Laboratorium holograficznym Uniwersytetu Artystycznego im. Magdaleny Abakanowicz w Poznaniu (fotografie z archiwów autorów).
- Ryc. 33–34. Małgorzata Witaszak, praca bez tytułu, 2012 r.; hologram, rama okienna, rozbite szkło; Żółte światło odtwarzania (fotografie z archiwum autorki).
- Ryc. 35. Karolina Machnicka, praca bez tytułu, 2012 r.; hologram, rama stalowa, mosiądz; Żółte światło odtwarzania (fotografia z archiwum autorki).



Ryc. 36–37. Jarosław Bogucki, *Akwarium*, 2010 r.; hologram, stal, system oświetlenia; zielone światło odtwarzania (fotografie z archiwum autora).

Ryc. 38. Jarosław Bogucki, *Między iluzją a rzeczywistością*, 2011 r.; hologram, stal, żywica syntetyczna, silnik elektryczny; żółte światło odtwarzania (fotografia z archiwum autora).

Ryc. 39–40. Jarosław Bogucki, *Koło*, 2016 r.; hologram, stal, żywica syntetyczna, silnik elektryczny; białe światło odtwarzania (fotografie z archiwum autora).

Ryc. 41–42. Joanna Sapkowska, *Little Pony*, 2013 r.; hologram tęczy, zabawka; wielobarwne światło odtwarzania (fotografie z archiwum autorki).

Ryc. 43–46. Dorota Gralewska, praca bez tytułu, 2015 r.; hologram światła białego; wielobarwne światło odtwarzania (fotografie z archiwum autorki).

Ryc. 47. Jarosław Bogucki, *Portret podwójny* (fotografia z archiwum autora).

Ryc. 48–49. Szymon Zwoliński, praca bez tytułu (autoportrety holograficzne 1, 2) z serii *Wypalenie*, 2019–2020; hologram, mechanizm ruchomy, drewniana rama (fotografie z archiwum autora).

Ryc. 50. Szymon Zwoliński, praca bez tytułu (autoportrety holograficzne 3) z serii *Wypalenie*, 2019–2020; hologram, mechanizm ruchomy, drewniana rama (fotografia z archiwum autora).

Ryc. 51. Szymon Zwoliński, *Bez tytułu* (1) z serii *Nie widzę, nie mówię, nie słyszę*, 2019–2020; hologram, mechanizm ruchomy, drewniana rama (fotografia z archiwum autora).

Ryc. 52–53. Szymon Zwoliński, *Bez tytułu* (2, 3) z serii *Nie widzę, nie mówię, nie słyszę*, 2019–2020; hologram, mechanizm ruchomy, drewniana rama (fotografie z archiwum autora).

Ryc. 54. Przykładowy zestaw do rejestracji hologramów Dienisjuka (Źródło: fotografie z archiwum V Pracowni Obrazowanie Przestrzenne UAP).

Ryc. 55–57. Przygotowanie materiałów (Źródło: fotografie z archiwum V Pracowni Obrazowanie Przestrzenne UAP).

Ryc. 58–59. Centrowanie wiązki laserowej w osi hologramu (Źródło: fotografie z archiwum V Pracowni Obrazowanie Przestrzenne UAP).

Ryc. 60. Układ do zapisu hologramu (Źródło: fotografie z archiwum V Pracowni Obrazowanie Przestrzenne UAP).

Ryc. 61. Ekspozycja (Źródło: fotografie z archiwum V Pracowni Obrazowanie Przestrzenne UAP).

Ryc. 62. Utrwalanie hologramu (Źródło: fotografie z archiwum V Pracowni Obrazowanie Przestrzenne UAP).

Ryc. 63–64. Zabezpieczenie hologramu (Źródło: fotografie z archiwum V Pracowni Obrazowanie Przestrzenne UAP).

Ryc. 65–66. Przykładowy hologram (Źródło: fotografie z archiwum V Pracowni Obrazowanie Przestrzenne UAP).

Ryc. 67. Olga Kucel, *Artifacts*, 2023 r. (fotografia z archiwum autorki).

Ryc. 68–69. Jakub Matuszewicz, *Autoportret*, 2023 r. (fotografie z archiwum autora).

Ryc. 70–71. Jakub Matuszewicz, *Autoportret*, 2023 r. (fotografie z archiwum autora).

Ryc. 72–73. Magdalena Czapiewska, bez tytułu, 2023 r. (fotografie z archiwum autorki).

Ryc. 74–80. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, *ADHD and Holographic Intervention*, 2022–23 (fotografie z archiwum autora).

Prace, których nie uwzględniono w wykazie, są autorstwa autorów opracowania.

Iceland  
Liechtenstein  
Norway grants



Programme Operated by:  
**f r s e**  
Foundation for the Development  
of the Education System

# ARTISTIC HOLOGRAPHY

## ENGLISH VERSION

Dr Jarosław Bogucki (higher doctorate)  
Dr Marek Sutkowski Eng.  
Dr Szymon Zwoliński

## HOLOGRAPHY

A guide on how to use the holographic technique for artistic purposes

### 1. What is holography

Used for many years, the term *holography* has found its way into the vocabulary of everyday language. Then, however, the meaning of the word is not always identical with its true definition. It is because the term *holography* belongs to the notions used in the field of optics, describing a method of recording information on a three-dimensional spatial scene in a high-fidelity manner. The *Encyclopaedia Britannica* defines it as follows:

Holography, means of creating a unique photographic image without the use of a lens. The photographic recording of the image is called a hologram, which appears to be an unrecognizable pattern of stripes and whorls but which — when illuminated by coherent light, as by a laser beam — organizes the light into a three-dimensional representation of the original object.

(<https://www.britannica.com/technology/holography>; accessed 31 March 2023)

The encyclopaedic definition seems complicated. It is therefore not entirely clear what a hologram really is. For the time being, let us assume, following the quoted description from the *Encyclopaedia Britannica*, that holography is a method of making a three-dimensional representation of an object or scene by means of a beam of light. It is therefore a way of recording an image while preserving its three-dimensionality, or spatiality and depth. In other words, holography allows us to show a solid whose spatiality we can perceive with our sense of sight. It can therefore be considered to be an immaterial sculpture. It is to be added, however, that holography, or rather certain holographic techniques, to be more precise, make it possible to use some means of expression that are difficult or even impossible to obtain in sculpture.

It is also worth mentioning here how the words *holography* and *holographic* are commonly understood. In the simplest case, they are seen as synonyms for the terms *spatial* and *faithful*. Considering only the definition, to some extent this cannot be denied. However, it is worth bearing in mind that this is only an approximation, a mental shortcut, and therefore one should approach the many colloquial, marketing and advertising uses of these terms with appropriate cautiousness.

### 2. Have you seen a hologram?

In a world in which the latest technological solutions surround us everywhere, it is highly likely that almost everyone who has visited any advanced or emerging economy at least once has come across holography and holograms. It should be added that, as a result of widespread access to information, virtually everyone — regardless of their origin or place of residence — is familiar with at least the concept of *holography*.

The most spectacular example of contacts with holography is the famous scene from the film *Star Wars: Part 4 — A New Hope*, in which Luke Skywalker recreates a 3D image of

Princess Leia stored in the memory of the robot R2-D2 with a message to Obi-Wan Kenobi (see Fig. 1). This projection is repeated in this part of the film saga, and holographic images have been used also in other episodes of the *Star Wars* series.

A short explanation is to be given to the reader here. Although we are dealing here with the idea of a holographic reconstruction of a certain scene, the projection method itself shown in this film remains unavailable to us. Of course, research work is underway so that this 1977 fantasy can be realised, and one can be almost certain that this will soon be achieved. For we already know how to make three-dimensional light images in space (volumetric techniques — see Fig. 2), although it must be added that these methods still differ from the vision seen in the film. Well, let's wait a little longer.

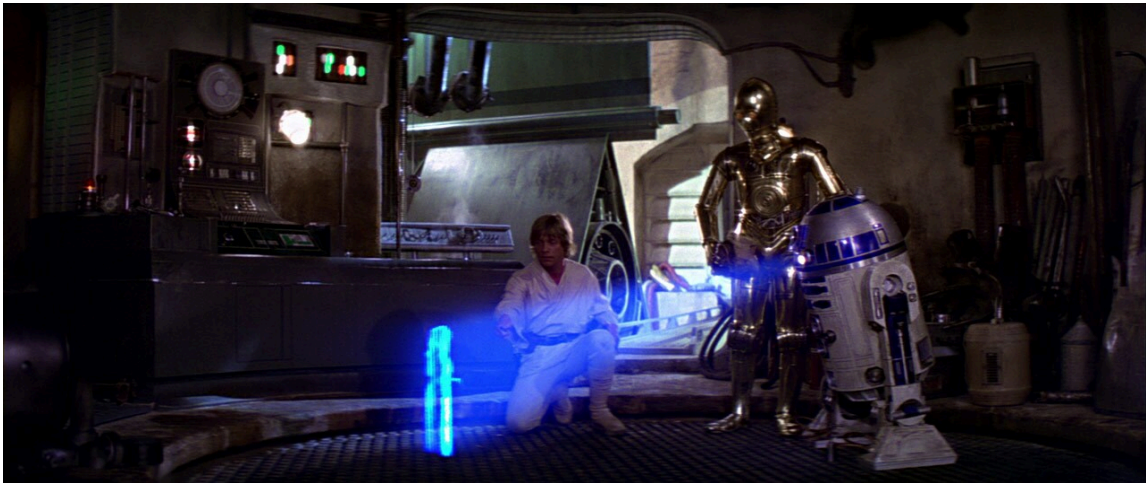


Fig. 1. Holographic image projection used in the film *Star Wars: Part 4 — A New Hope*.

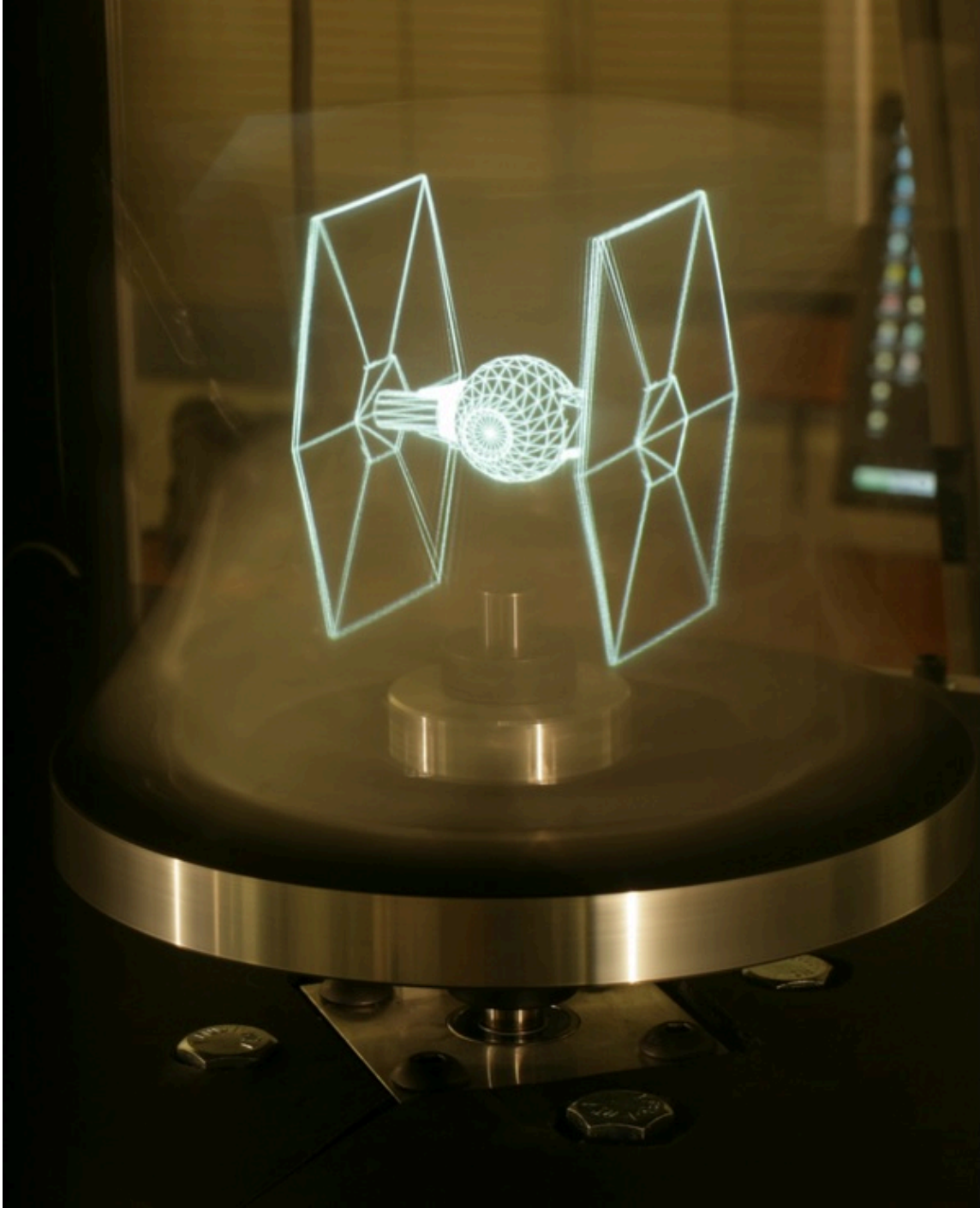


Fig. 2. A light projection method used to make an image of a *Star Wars* vehicle in space. In this case, a spinning mirror and non-coherent light projection were used.

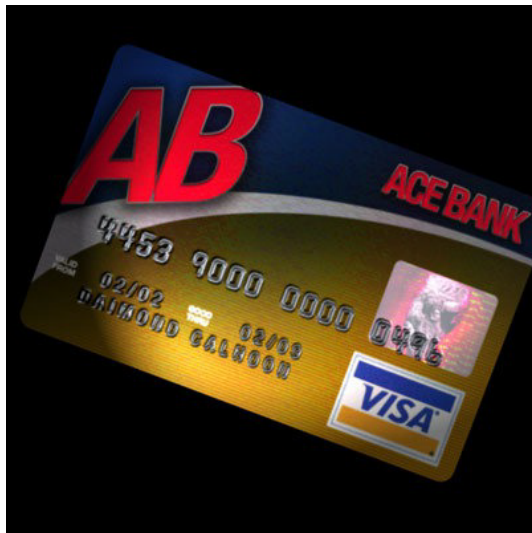
Another example of using holography in everyday life is popular solutions preventing products from unwanted copying or counterfeiting. These include protections for banknotes, bank cards, tickets, etc. Commonly used solutions include strips and fields most often containing spatial information recorded in the form of a holographic image. For example, Fig. 3 shows a holographic stripe on a Polish 500-zloty banknote. Similar



holograms can be found on bank cards, tickets or stickers used on many products.



Fig. 3. A 500-zloty banknote of the National Bank of Poland, in which the holographic security element is used — the stripe marked with the number 2.



ig. 4. A bank card security hologram.

Everyday products based on diffraction, i.e. the deflection of light accompanying the process of reconstructing a holographic image, are becoming increasingly common. These include items of clothing, bags, belts, key rings and even skateboards. These are not precisely holograms, but the principle of their operation is identical to that of a hologram, which is why they are generally considered to be an example of a holographic technique.



Fig. 5. Women's garment made of fabrics using the physical phenomenon of diffraction, the so-called holographic fabric.



Fig. 6. A skateboard with a diffraction layer, the so-called holographic skateboard.



### 3. Pictorial holography in the daily life of the artist

The next step in the presentation of the holographic technique is a discussion of its most interesting application, namely pictorial holography, including artistic holography. Unlike the above examples, here we are focusing on the spatial reproduction of a recorded object or scene made in such a way as to make the viewer get the impression that they are looking at a real object or scene. Such an image is therefore characterised by high fidelity and parallax, i.e. the possibility of viewing it from different points.

In order to show what kind of an artistic message it is about, it is best to use some examples. In the field of artistic holography, the most famous figure is undoubtedly Margaret Benyon (1940–2016), a British pioneer as regards using holographic technology in art. A copy of one of her most famous holograms, *Tigirl*, is shown in Fig. 7. In this art object, the artist used the method of multiple exposures to achieve the effect of interpermeating spatial images. In the final presentation version, *Tigirl* is a reflection hologram to be viewed in white light.



Fig. 7. A multi-exposure hologram made with a pulsed laser: Margaret Benyon, *Tigirl*.

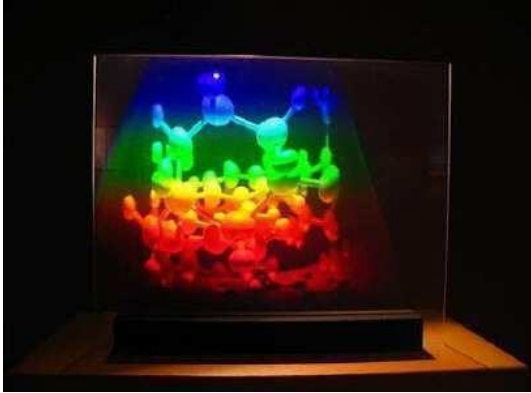


Fig. 8. A rainbow hologram viewed in white light.

In contrast, in Fig. 8 an image reconstructed from a rainbow hologram is shown. The technique was introduced by Stephen Benton in the late 1960s. These holograms are characterised by the absence of vertical parallax while maintaining horizontal parallax. They can be reproduced by means of white, non-coherent light. Rainbow holograms are transparent ones. The viewed image glitters with all the colours of the rainbow due to selective diffraction happening in the process of reconstructing the visible image. It consists in particular fragments of the stripe structure of the hologram being reconstructed by means of the narrow waveband of the next range of the spectrum of visible light — as it were, ‘selected’ from the full spectrum of white light.

Another example of how holography can be used is the artwork made at the University of the Arts Poznan by Jarosław Bogucki and Szymon Zwoliński. They make use of specific features of the holographic image, i.e. the spatiality and variability of the image reproduced depending on the point from which it is viewed, and combine them with real spatial forms in the form of sculptures. The coexistence of spatial objects and a faithful holographic image makes it possible to achieve an absolutely unique visual effect. Some examples of the art objects are shown in Figs. 9–11.



Fig. 9. Jarosław Bogucki, *Narcissus*, height 270 cm, bronze, a hologram, chipboard, steel, 2018.

Fig. 10. Jarosław Bogucki, *Word for Word*, 40×50 cm, a hologram, 2018.

Fig 11. Szymon Zwoliński, *Untitled* (holographic self-portraits 1, 2), from the series *Burnout*, 2019–2020.

Denisyuk holograms can be considered to be a specific variant of the holographic technique. The name commemorates Yuri Nikolaevich Denisyuk, a Russian scientist who invented this technique of making holograms. The advantages of Denisyuk holograms are: using the simplest structure to record them and obtaining a hologram to be reproduced in white light. In addition, such holograms are easy to recognise, as the reconstructed image lies completely behind the hologram plane, giving the impression of looking at an exhibition display case.



Fig. 12. Professor Ventsi Sainov showing a Denisyuk hologram of a pair of nineteenth-century pistols used by the Russian Army. The hologram was made by his institute in 1982 on some of the finest Russian emulsions, making it a fine collectible piece.

#### **4. The origins and development of holography**

The basic principles of holographic recording can be traced back to the Polish physicist Mieczysław Wolfke, working in the 1920s, whose work dealt with lensless image recording of a molecular lattice. As for the general theory of holographic recording, it was developed in the late 1940s and early 1950s by Dennis Gabor, a Hungarian physicist working in Great Britain. The technique described by Gabor was intended to make it possible to increase the resolution of the electron microscope in order to observe individual atoms. However, it could also be used to encode image information. Gabor even made some attempts to record simple objects in an axial recording system. However, he did not achieve satisfactory results because he used a mercury lamp with relatively low coherence. It was not until the development of devices emitting



high-coherence light beams, i.e. lasers, which appeared at the end of the 1950s, that there was more interest in holography. In 1962, Emmett N. Leith, an American, and Juris Upatnieks, a Latvian, made the first off-axis holographic recording by means of a continuous emission gas laser. Thus the rapid development of holography began.

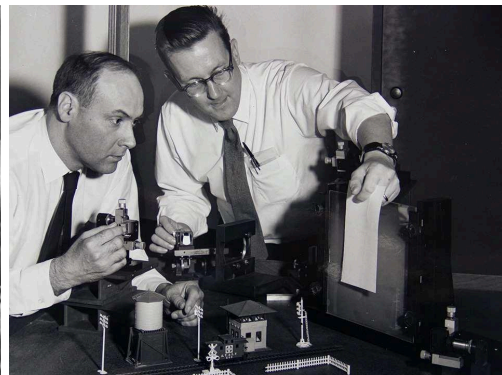
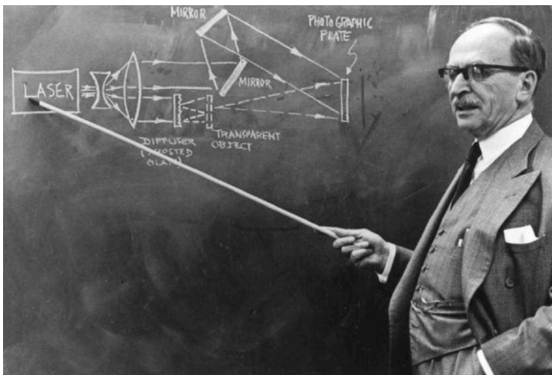
It was approximately up to the mid-1970s that papers on various holographic techniques and their applications were regularly published. The necessity of complex optomechanical systems and high costs of operating holographic workstations contributed to a decline in the intensity of research in the late 1970s.

At the same time, it should be mentioned that in 1972 Leonid Yaroslavsky and Nikolai Merzlyakov developed the theoretical basis for recording holograms by discrete methods. The spread of lasers, advances in recording media used in holography, and the activities of people perceiving holography as an excellent and unique means of artistic expression have triggered the current renaissance of holography. A great number of scientific, R&D and commercially-oriented centres (let us mention the commonly used security holograms), as well as advertising and artistic holography studios are constantly working to ensure the development and improvement of methods for recording full, 3D image information of the object and the scene.

An extremely important step in the development of holography was the development of digital holographic printing, which was achieved by Stanislovas Zacharovas (the head of the Lithuanian Geola laboratory). This process uses a holographic camera that collects input data in incoherent light, and a holographic printer which on the basis of the data "prints" a diffraction grating on a continuous medium in an optical manner. The three-dimensional image is then reproduced in white light with full horizontal parallax retained.



Fig. 13. Mieczysław Wolfke.



Figs. 14–15. Dennis Gabor (left); Emmett Leith and Juris Upatnieks (right).



Fig. 16. The Geola holographic printer.

### 5. The principle of holographic recording

In any system used to record holographic images, there are two interfering beams. In the simplest case, these are two plane waves. If these are directed at a certain angle to each other to a recording medium, a grid of rectilinear striations is obtained. Fig. 17 shows the position of the recorder and the schematic pattern of the recorded microinterferogram. Let us introduce here the concept of a reference wave of the holographic process (the  $E_r$  wave). The object wave ( $E_p$ ), on the other hand, is the beam carrying information about the scene or object being recorded.

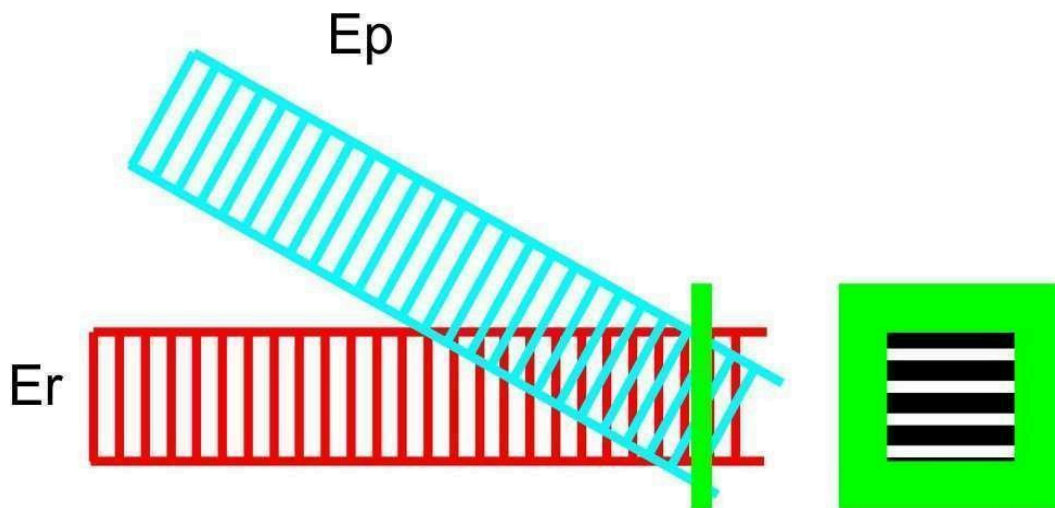


Fig. 17. Interference of two plane waves generates a grid of rectilinear striations;  $E_r$  — the reference wave,  $E_p$  — the object wave.

If in one of the branches a wave falling on the medium is modified (e.g. if a spherical wave whose source is a luminous point is used), a mosaic of circular interference

striations will be obtained in the plane of the image recording (Fig. 18). In the special case of both beams of the same direction, the centre of the circles defined by the striations will be the very centre of the recorded hologram.

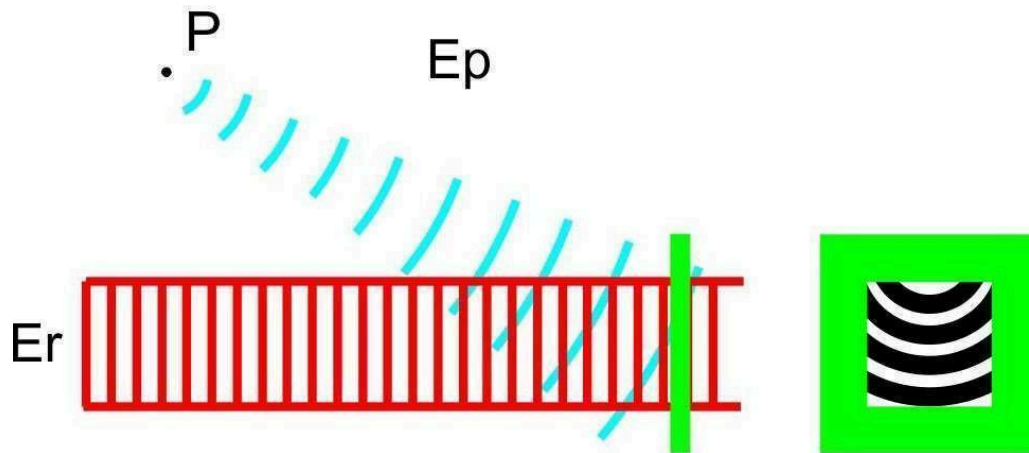


Fig. 18. Interference of the plane reference wave  $E_r$  and the spherical object wave  $E_p$  generates a grid of concentric striations.

Let us now apply a more complicated modification. Let us assume that one of the waves is a wave front exactly corresponding to an object. This could be, for example, a wave reflected from the object we want to holograph. At the point of the recording, there will be an interference of the two waves, the reference wave  $E_r$  and the object wave  $E_p$ , resulting in an irregular, seemingly disorderly tangle of striations of various positions and contrasts (Fig. 19). The whole information about the object is encoded here in the contrast and location of the striations. These are the object's luminance, or amplitude information, which tells us about the distribution of grey tones on its surface, and phase information, which is responsible for the spatiality of the object.

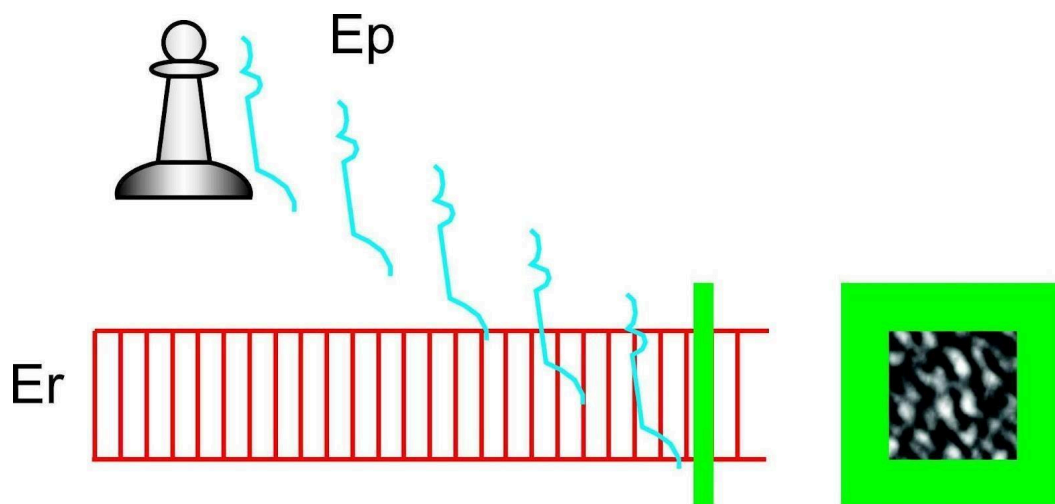


Fig. 19. Interference of the reference wave  $E_r$  with a flat wave front and the subject wave  $E_p$  originating

from a complex object produces a complex grid of striations, which can be understood as encoded information about the characteristics of the object wave and therefore encoded information about the scene or object.

## **6. The principle of holographic reconstruction**

In holography, the striation pattern (microinterferogram) obtained as a result of the interference of the reference wave and object wave is recorded on a recording medium, such as holographic film, most frequently containing a layer of silver halides. When viewing the hologram thus created with the naked eye, we are unable to read any information. All we see are disorderly, meaningless little specks, alternately dark and light (when viewed at high magnification).

Adequate illumination of the hologram is the prerequisite for the formation of a holographic image. Only if this condition is met will it be possible to reconstruct the image as a result of the diffraction of the light illuminating the hologram on the recorded striated microstructure, and to reproduce the object wave with very high fidelity. It can be said that the wave reconstructed from the hologram will be like a fragment of the wave coming from the real scene or object.

In accordance with how diffraction operates, part of the energy of a wave falling on a diffracting element (i.e. a hologram in the case discussed here) will be propagated according to its initial direction. Here, this wave is referred to as the zero diffraction order. A part, however, will be deflected as enforced by the structure of the microinterferogram. These will be the first and possibly subsequent diffraction orders. In holographic technique, we are only interested in the first row.

Let us assume that we are using the hologram recorded in the system shown in Fig. 18, where a point source of light was the object. By illuminating the microinterferogram structure recorded on the hologram with a waveform identical to the reference waveform used during the recording, we will obtain two images of the point source of light — an apparent one and a real one (cf. Fig. 20). In the classical case, the reconstruction will result in two images, namely  $P'$  — the simple, apparent one, being an almost perfect copy of the object, and  $P''$  — the coupled, real one. The  $P'$  image can be considered to be an inversion of the original, an image opposite to the original. (Since it is of less interest to us from the point of view of imaging, and, moreover, it is rarely used in imaging, let it suffice here that such an image physically exists).



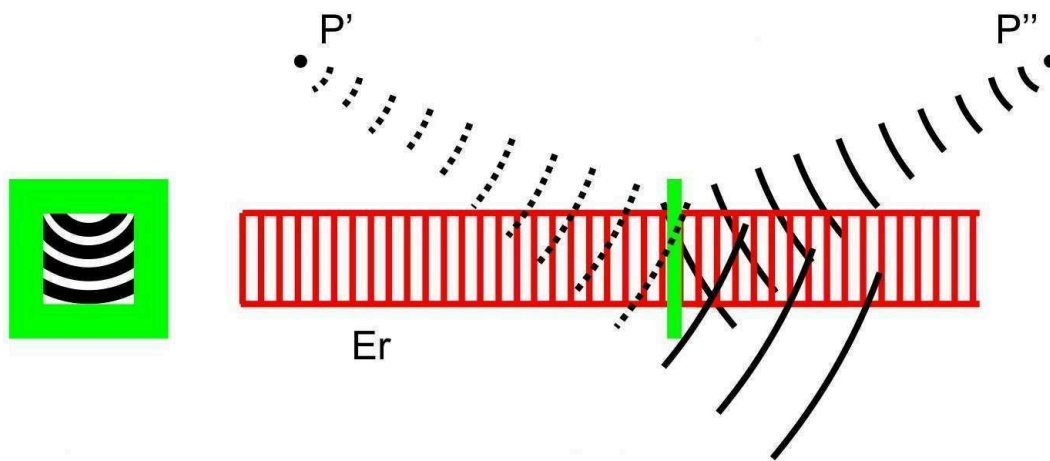


Fig. 20. The reconstruction of the hologram as recorded in the arrangement shown in Fig. 18. A person viewing the reconstruction of this hologram (i.e. the apparent image  $P'$ ) will have the impression that they are looking at the actual source of point light that was used in the recording (i.e.  $P$  in Fig. 18). Yes, what we mean is precisely that to the viewer  $P'$  will be identical to  $P$ .

When we now replace our hologram with one containing information about an object (e.g. obtained as a result of the recording by means of the system shown in Fig. 19), and illuminate it with a reconstruction wave that is consistent with the reference wave  $E_r$ , diffraction will cause the reconstruction wave to bend so that the first diffraction rows will make two images of the object, i.e. an apparent one and a real one (see Fig. 21). The apparent image will be stereoscopic, i.e. it will exactly match the features of the object and will be in the same 'location' as the object. It can be seen with the naked eye, or photographed with a camera in the same way as an object can be photographed. It will also have full horizontal and vertical parallax, so the viewer will be able to 'look' behind the object from either side, as well as above it. Parallax can be said to be limited by the 'window' of the hologram.

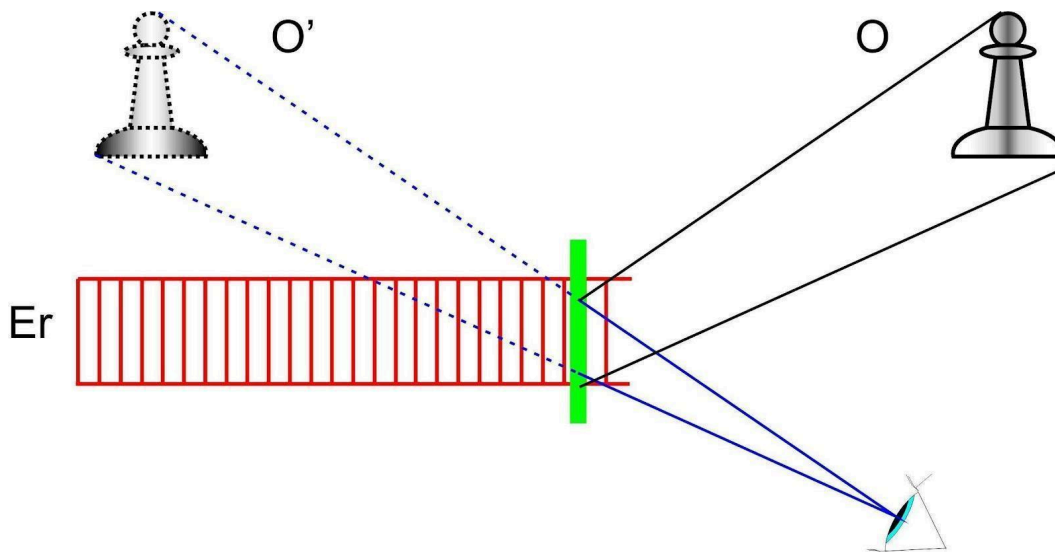


Fig. 21. A hologram recorded by means of the system shown in Fig. 19, illuminated with a reconstruction beam identical to the reference beam  $E_r$  used during the recording, will enable a faithful copy of the waveform representing the real object to be reproduced. This will — most importantly in this case — give the observer the impression of viewing the real object. Holography is therefore the most faithful recording of image information about a scene or object.

## 7. Requirements

There are several conditions that must be met for a hologram to be recorded correctly. First of all, in accordance with the fundamentals of physics, the phenomenon of interference requires using coherent waves. Coherence means the ability to maintain a constant phase difference during propagation. In addition, the waves must have the same azimuth of polarisation, be monochromatic and stable in time. A laser is a light source that meets the above requirements. However, not every laser is suitable for use in holography, as some lasers do not have sufficient parameters to achieve a homogeneous interference field during the process of recording a hologram.

Moreover, stability of the recording system must be maintained during recording. It is similar to photography, where we will obtain a flawed image if we do not keep the recording system, the scene or the object stable during exposure. In holography, failure to maintain the stability of the interference field will cause a similar effect. The striations will be of worse quality or will be lost altogether. However, the requirements are much more stringent here, as the striations of the microinterferogram have tiny dimensions (of the order of  $\mu\text{m}$ – $\text{nm}$ ). In conclusion, we must emphasise that care must be taken to ensure that the recording system is exceptionally rigid and as isolated as possible from any external influences, such as vibrations and temperature changes.

In modern practice, the above requirements are not difficult to meet. It is very easy to ensure rigidity, simply by careful design and construction of the workstation. Other requirements can be dealt with, e.g. by limiting the exposure time of the recorder as much as possible. In doing so, some simple relationships must be kept in mind. The more photosensitive the material and the more intense the laser beam, the shorter the recording time is required. In practice, it turns out that when strict time limitations are observed holography can be used even with relatively simple and cheap lasers (e.g. laser diodes) and at a certain instability of the system itself (even unstable objects can be recorded).

## 8. White light

So far, we have mainly discussed cases where a laser is required for both the recording and reconstruction processes, thus a light source not to be found in every drawer. Obviously, in the past this was a significant obstacle to the popularisation of holography and holographic images, so methods have been developed to prepare holograms that can be viewed by means of non-coherent and broad-spectrum (non-monochromatic, including white) light. Modern technology even makes it possible to collect input data for the recording process without the coherence requirement being met, but we will skip this subject in this paper. We encourage you to do research and expand your knowledge in this area!

If we look at the diagrams showing the holographic recording process (Figs. 17, 18, 19),

we can see that the interference striations are arranged in a pattern that changes in the plane of the recorder (emulsion). If we take the material with the hologram thus recorded and look at it at high magnification, we will see (in the general case) striations arranged along the edges of this material (hologram) — see Fig. 22. The reconstruction of such a hologram is shown in Figs. 20 and 21. If in this process we replace the laser light with white light, the reconstruction will be disturbed and no image will be obtained. The viewer will certainly not like this.

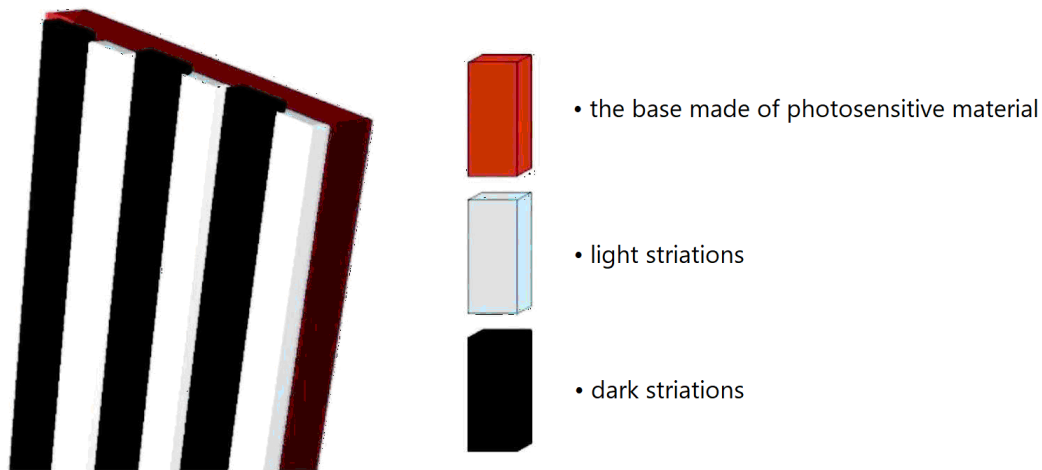


Fig. 22. The striations of the so-called traditional hologram are arranged in a pattern that changes in the plane of the material. The pattern is variable and depends on the dimensions of the hologram. The diagram shows rectilinear striations for simplicity (such striations are a result of interference of two flat-front waves), but in holography the striation structure is far more complicated.

However, we will be able to view a hologram in white light and obtain a full reproduction of the holographic image (i.e. with both space and parallax preserved) if we use a method that allows us to exploit the selectivity of diffraction volumetric grating (Bragg's diffraction). A model of such a grating is shown in Fig. 23.

We can imagine a volumetric grating (in our case, a volumetric, or thick hologram) as striations the pattern of which changes with the thickness of the information carrier (emulsion). If we illuminate a hologram of this kind with white light, only for a specific wavelength will diffraction occur. Thanks to it the light emitted by the reproduction source does not have to be monochromatic. However, it must be ensured that the reproduction is done using sources of the smallest possible size, preferably point sources. When this condition is not met, many images are reproduced, of various positions, so the holographic image is out of focus, blurred. Why does this happen? A non-point (continuous) light source can be imagined as a set of point sources. Each such source, being a component point source of our continuous source, will cause an image reproduction appear at a slightly different position. Thus, the composite of these reproductions will produce a multiplied, blurred, indistinct image.

When such a volumetric grating is made to contain three layers, each of which is a diffractive volumetric grating adjusted to each of the three wavelengths, corresponding

to the three basic components (RGB), we obtain the reproduction of a colour image by means of only one light source, i.e. a source of a point white light. We will then produce a colour hologram to be viewed in white, reflected light.

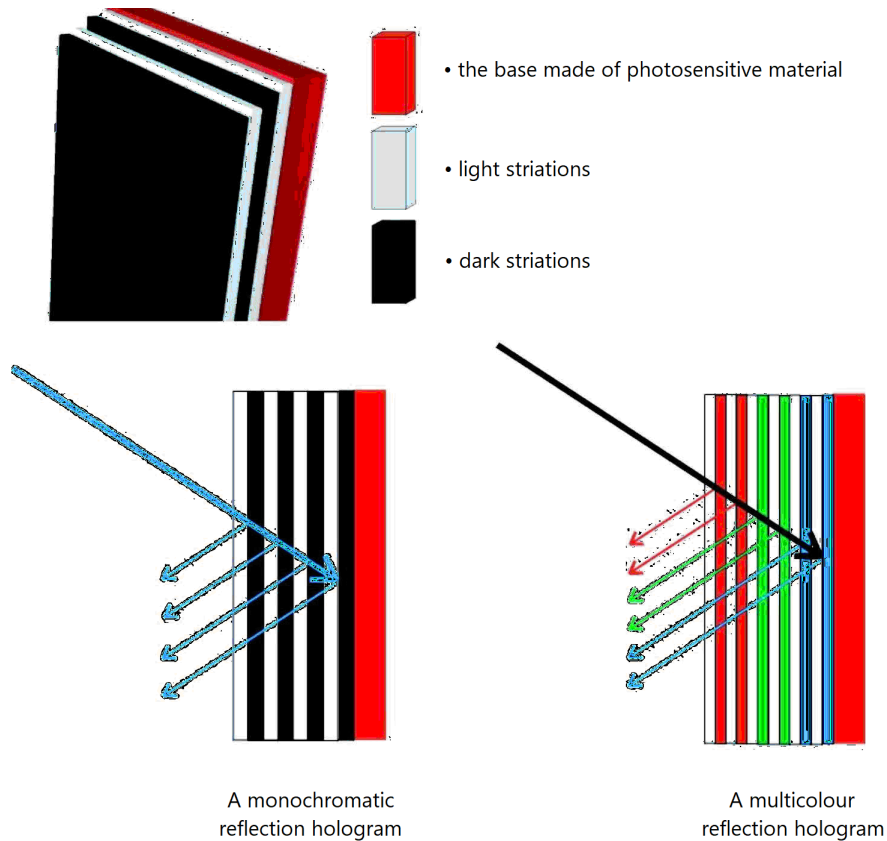


Fig. 23. The structure of a volumetric grating (a volumetric or thick hologram) consists of striations arranged in a pattern that changes with the thickness of the media. For such gratings, diffraction occurs at a well-defined wavelength. If a volumetric hologram consists of three layers, i.e. three volumetric gratings, a reproduction of a colour image is obtained.

### 9. Reflection and Denisyuk holograms

Let us now focus on the methods of recording reflection holograms, i.e. holograms with volumetric striations. A hologram called planar, i.e. with striations arranged in a pattern that changes in the plane of the hologram, is obtained in systems where the object beam  $E_p$  and the reference beam  $E_r$  fall on the recording medium from the same direction. Volumetric holograms, so-called thick holograms, in which the striations are arranged in a pattern that changes with the thickness of the carrier, require a configuration in which the object beam and the reference beam reach the recording medium from opposite sides.

It is to be remembered note that the position of the holographic image will be consistent with that of the real object (of course, relatively to the reference point on the hologram itself), i.e. it will be located at the same distance, it will remain the same size, etc. If

during the recording the object is at a great distance from the plane of the recording medium, the reconstructed image will also appear to lie very far behind the plane of the hologram. Of course, it is possible to make a volumetric hologram so that the reconstructed holographic image is in any position relative to the hologram plane — it can even be partly in front of and partly behind the hologram plane — but this requires copying, is relatively complicated and involves using complex equipment. You can see this process in a class at the pulse holography laboratory at the University of the Arts Poznan.

In the late 1950s and early 1960s, the Russian scientist Yuri Denisyuk developed a method of recording a volumetric diffraction grating by means of a single beam of light. In this method, holographic recording systems are created in which the object to be holographed is placed directly behind the plane of the recording medium (e.g. holographic film) and the reference beam  $E_r$  is directed at it from the other side. The holograms obtained in this way are called Denisyuk holograms.

In practice, the Denisyuk system used to record holograms is the simplest of all the methods used in holography technology. In order to build it, one needs a source of coherent light (laser), a spatial filter (the so-called pinhole), a holder for the recording medium and a table placed behind this holder allowing the holographic object to be placed very closely to the plane of the recording medium. The light beam that has passed through the recording material will then be reflected off the object behind it and will become, in the holographic system, the object beam  $E_o$ . This beam will interfere with the beam falling directly that has the function of the reference beam  $E_r$ . An example of such an arrangement is shown in Fig. 24.

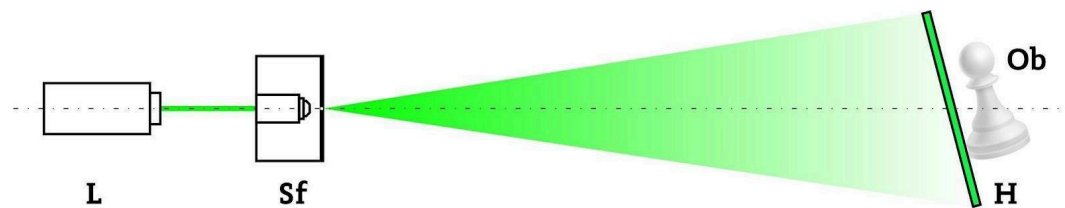


Fig. 24. The basic system for recording Denisyuk holograms. A beam of coherent light from the laser L arrives at the spatial filter system Sf (consisting of a microscope lens and an accurately made small-diameter pinhole). According to the principles of wave physics, the filter system is a very good approximation of a point source, behind which the wave front becomes spherical. The beam illuminates a system consisting of the recording material H and the object Ob. The inclination of H and Ob is recommended because in the process of reconstruction the direction of the reconstruction beam should be the same as the direction of the propagation of the reference beam.

## 10. Variations of Denisyuk hologram recording system

Fig. 24 shows the layout with the Sf spatial filter. Unfortunately, this element is relatively expensive and quite complicated to use (it needs to be justified). However, it is possible to simplify the set and use only a microscope objective instead of the Sf filter. The disadvantage of such a solution is an inhomogeneous beam, which may later cause, for example, spots on the object, uneven illumination of parts of the object or sometimes undesirable interference patterns. Sometimes, however, it is worth opting for this, as



your work is facilitated.

A further modification of the recording system shown in Fig. 24 is adding a collimator (see Fig. 25). This is a lens used to convert a spherical-front beam into a flat-front beam. This will result in a more uniform illumination of the object. The collimator must be large enough in diameter to allow the beam to fall over the entire surface of the recording material. When reconstructing, it is recommendable to ensure that the reconstruction light source reproduces the recording system as closely as possible. In practice, sunlight is the best for reconstructing Denisyuk holograms recorded in this way.

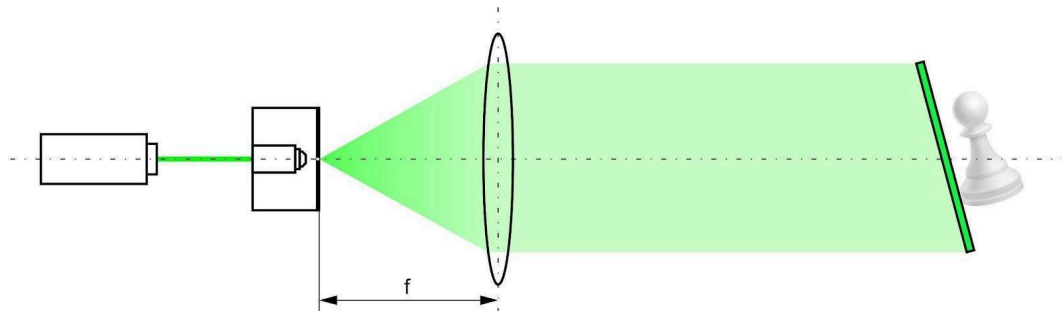


Fig. 25. Denisyuk hologram recording system with a collimator. If a flat-front beam is to be obtained, the point light source (i.e. the pinhole) must be exactly at the focus of the lens. This is checked, for example, by measuring the diameter of the beam at a small distance behind the collimator and at a much larger distance — the diameters should be identical.

We have written above that the recording material H and the object Ob must be placed at an angle to the optical axis. But what can be done if we are unable to meet this requirement, e.g. due to mechanical constraints or due to the nature of the object? It is possible to make the recording by means of a beam which is perpendicular to the recording material (see Fig. 26). Then, too, it must be remembered that the light source and the reference beam must be aligned in the same way with respect to the hologram. The reconstruction light should therefore fall perpendicularly on the hologram.

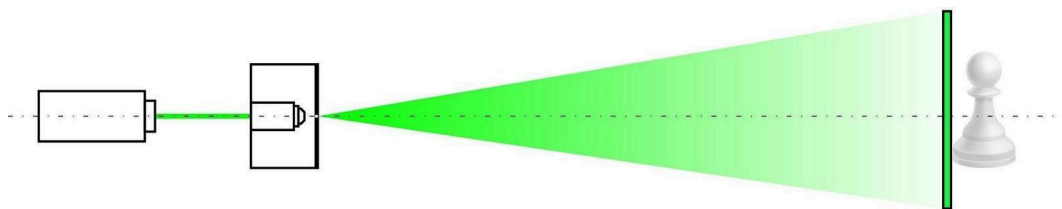


Fig. 26. A Denisyuk hologram recording set with a light beam perpendicular to the recording material.

## 11. Recording materials

When recording holograms, holographic materials based on silver halides (i.e. similar to photographic emulsions, but with a much higher resolution and lower photosensitivity)

are most commonly used; the materials are available mostly in the form of film or membranes.

When using film, it is best to cut it properly before work so that it can be placed comfortably in the holder. To do this, stick the film onto a sheet of glass of low thickness. Both film (stuck to glass) and film should be used so that the emulsion faces the object. Silver-based materials require photochemical processing in special solutions. The first process is holographic development, followed by rinsing and then bleaching. The developer is supposed to reveal the latent image that has been obtained by the exposure. The process of reduction of the photosensitive silver halides to metallic silver occurs at this stage. Since in a holographic system with volumetric striations being formed their variation occurs with the thickness of the emulsion, the material should be strongly blackened after a proper development process. Such a hologram is not suitable for reconstruction, as it would absorb all the radiation of the reconstruction beam. To enable effective reconstruction, a bleaching process is used during the hologram processing. Bleaching is intended to remove metallic silver from the developed areas and cause that instead of an intensity grid (where the hologram striations differ in brightness) a phase grid is formed (where the striations differ regarding their light refraction indexes). In the case of thick holograms, bleaching is necessary, as in an intensity grid dark striations would absorb almost all the radiation power of the reconstruction beam, making the reconstruction impossible (or resulting in very poor efficiency and poor image visibility). The processing should be completed with a thorough rinsing and drying of the material.

The second type of recording materials frequently used in holography are photopolymers. The most important difference is that they do not require photochemical processing, and guarantee a very high diffraction efficiency (the reconstructed image is characterised by very high brightness and clarity). Once the hologram has been recorded, it is sufficient to fix such material by exposure to UV waves. The preparation of the material, however, is a slightly more demanding process. A photopolymer sheet is quite thin and flaccid, so it needs to be carefully applied to a glass substrate before the recording process. Unfortunately, these materials are very sensitive to contamination. Even a tiny speck of pollen or slight contamination of the substrate will result in a failure to record the interference grating at this point and thus a black spot ('hole') in the reconstructed image. The glass must be flat, faultless, without air bubbles, bumps or thicker parts. It must be clean, thoroughly washed and dried. Care must also be taken to ensure that the pasting takes place in clean air, free of dust and particles. The material prepared in this way is placed in the recording set, as halogen-silver materials are, with the light-sensitive layer, or photopolymer, facing the object.

## **12. Exposure**

Exposure is a parameter impacting the quality of the final hologram to a great extent. The better the contrast of the holographic striations, the higher the diffraction efficiency and thus the better the reproduced image. The laser power and beam size determine the exposure value. The higher the power and the smaller the beam size, the higher the

exposure is. Time is the second parameter determining exposure. The longer it is, the higher the exposure. When adjusting these parameters, we need to choose the exposure that is appropriate to the material used — to its type and dimensions.

In practice, we have a constant laser power for a given system. What we can usually change, however, is the size of the beam in the plane of the recording material. This size will be adjusted so as to illuminate the holographic material of the assumed dimensions as evenly as possible. Once we have set up the recording set accordingly, we can start adjusting the exposure length.

Ideally, the density of the light beam falling on the plane of the recording material should be measured. However, if you do not have a suitable measuring device, exposure calculators, such as the tool available at <https://www.geola.com/online-exposure-calculator/>, can be helpful. It should be remembered that the calculated time is an approximated value, which may not necessarily be the best in your particular conditions. It is therefore advisable to make your own exposure trials, changing only the exposure time, while leaving the other parameters and the layout and object unchanged. The optimum exposure time will be the one time for which the highest diffraction efficiency is obtained, i.e. the clearest and brightest holographic image.

In practice, you should aim for the shortest possible exposure times. This is because the shorter we expose the holographic material, the lower the risk of instabilities ruining our hologram.

## **USING ANALOGUE HOLOGRAMS IN ARTISTIC OBJECTS AS EXEMPLIFIED IN ARTWORK MADE IN THE HOLOGRAPHIC LABORATORY AT THE MAGDALENA ABAKANOWICZ UNIVERSITY OF ART IN POZNAN**

The Spatial Imaging Studio is equipped with Geola's Pulsed Holography Studio HS-5, a system enabling creation of analogue holograms for artistic purposes, to the maximum size of 100 by 100 centimetres. Artworks prepared by students in the studio during the educational process are made in accordance with the studio curriculum that envisages using holograms as a key means of artistic expression. Students work on set tasks whose level of difficulty is adequate to the knowledge being gained during the course and skills of particular participants.

Working on a set task using a hologram as an element of a coherent unity is a multistage process in which the following phases can be distinguished:

- preparation of an object or spatial arrangement to be recorded holographically;
- the process of recording and necessary adjustment of parameters of light;
- the final exposition that has to meet specific hologram lighting requirements.

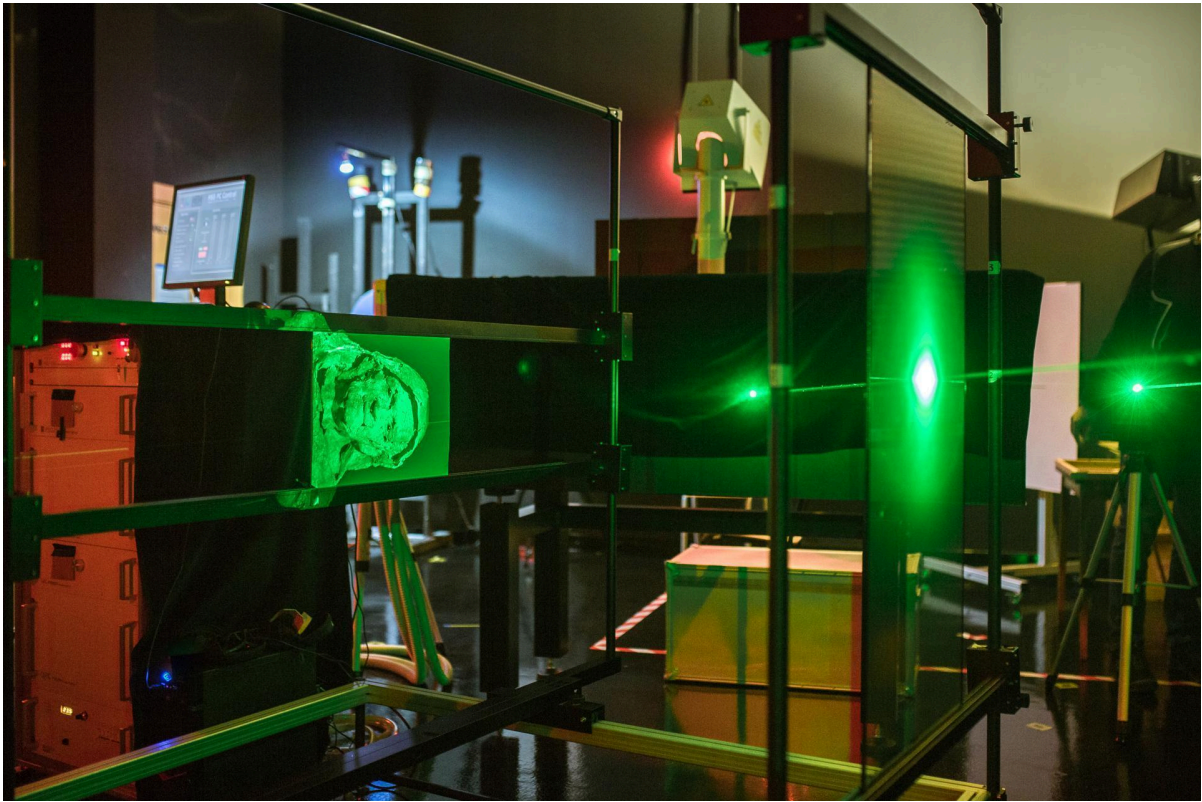
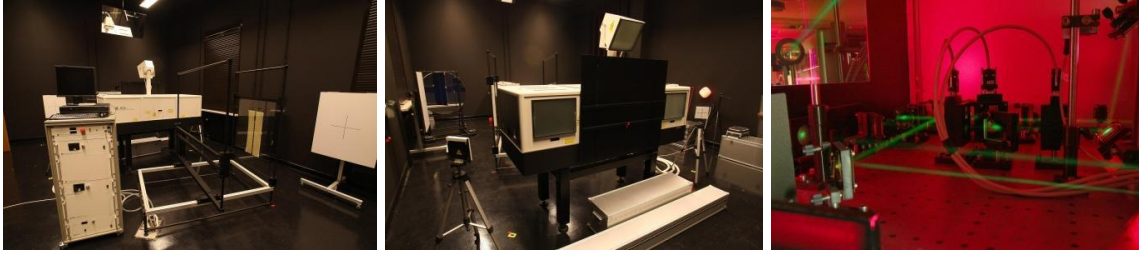
The didactic process in the studio is closely related to the above stages which determine the course of artistic work by students. The choice of an object or situation to be holographed is of key importance. Due to holography being a manipulation of a real picture, a spatial object or a fragment of a spatial situation can come into being in a new form. The object is deprived of corporeality and reduced to an illusionary image that can be shaped in various ways having an impact on its final appearance. Preparation of the object is frequently a long-lasting process that involves using different sculpture and workshop techniques, an essential skill in the creation process being an ability to look at the object and its later setting with a hologram in view, this monochromatic shot of a spatial situation being the target form.

Strong emphasis is placed on the skill of a conscious use of the object beam in the creative process, as it determines the final outcome, and of a creative approach to the process of exposure, e.g. in attempts of multiple exposures or preparations of after-shot animated holograms. Decisions concerning the choice of the final colour of a hologram used in an artwork are also of great importance.

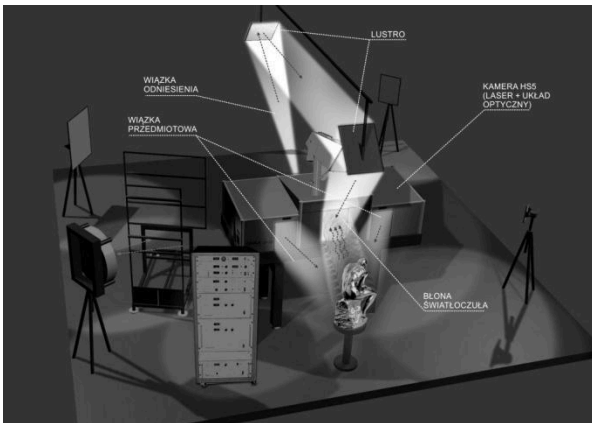
When planning the final presentation, one must take into consideration demanding exposition conditions, namely the necessity of using a separate source of reconstruction light for each hologram. This requirement may limit the possibilities significantly, but it may also turn out to be an added value with a beneficial contribution to an artwork.

The long history of the studio has resulted in innumerable student realisations and works of art with key roles played by holograms. These artistic realisations are results of searching for new, non-cliché conceptions using holograms in creative ways as a means of expression that is interesting and adequate to artistic projects.

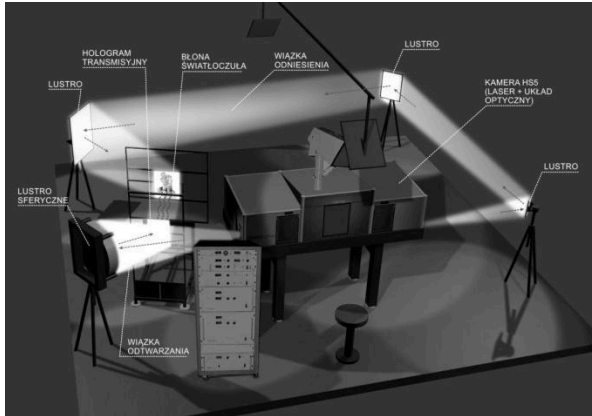
Creative activity of students contributes to popularising holography, a rare artistic field. Their artistic realisations are interesting examples of creative and development-enhancing methods of using this technology.



Figs. 27–30. The Holography Lab at the Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan.







Figs. 31–32. Diagram showing transmission hologram and white-light hologram exposure in the Holographic Laboratory of the Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan.

### Holographic art

With rare exceptions, holographic images are associated with a certain form of 3-D photography used to record objects or situations. In the process of such holographic recording a creative act is limited to making a few necessary decisions concerning, *inter alia*, the choice of the object to be holographed, the composition and/or the parameters of the object beam responsible for the way of illuminating the recorded situation. Further actions related to the technical process of recording a hologram more often than not have no direct impact on its presentation, with the possible exception of a change of the final colour of the reconstructed hologram. The choice of the final exposition is the last decision to be made, the solution opted for most frequently being hanging a framed hologram on a wall and illuminating it with white reconstruction light.

Writing about holographic art, however, I mean a concept far wider than the above example, exceeding it with a range of expectations, both of the viewer and the artist.

Already in the first years of the history of holography a discussion arose whether in fact it is a science, or an art. At the beginning a large part of artistic circles did not consider holography as a medium of visual communication that could be used in art. This opinion was formed because of technical aspects and complexity of the process of preparing holograms, which limit freedom of artistic creation to a large extent, as it is determined by a technical factor. After some time, however, scientific communities took interest in promoting holography among artists, as it was hoped that it would develop in areas lying outside the province of science. Personally, I am in favour of combining these two fields, especially insofar as the education is concerned, upon the assumption that science and art can be complementary to each other and have a positive impact on the didactic process, which can be attested by the activity of our Spatial Imaging Studio.

The renowned Polish photographer and theoretician of photography Stefan Wojnecki writes as follows: “If a kind of creative activity is to be regarded as an artistic discipline, it must have particular means of artistic expression, characteristic for this activity, which we call autonomous means of artistic expression.”<sup>4</sup> Despite these sentences having been written in a context of an utterance concerning photography, an older sister of

<sup>4</sup> Stefan Wojnecki, *Moja teoria fotografii*, Uniwersytet Artystyczny w Poznaniu, Poznań 1999, p. 16.

holography, it is just because of this kinship that we can apply them also to holography, which undoubtedly meets this criterion. Now holography is nearly fifty years old and relatively well established despite being a very young artistic discipline. Although holography remains a niche discipline, I do believe that establishment and development of studios similar to our holographic lab contributes to its further development and popularity especially in the arts.

It is to be remembered that holography is only a tool used by an artist who finally decides about the way it is employed. I am of the opinion that a creative approach to artistic activity using holography involves a necessity of a constant searching for new methods of employing a holographic image and carrying out numerous experiments at every stage of work with a hologram, i.e. during the process of preparing the situation to be holographed, as well as while performing the exposure and planning the final presentation.

### **Technical methods and artistic means used in some examples of artworks**

The examples discussed below are mostly artistic objects made by students during the courses in the UAP Spatial Imaging Studio, and individual artistic realisations by the author. The selection of the examples is determined by the intention to demonstrate various methods of using holograms in artistic objects and employing its properties having a key impact on the perception of the installation. Artistic aspects are of secondary importance here.

#### **1. Reconstruction light (methods of reconstructing white-light holograms and rainbow holograms)**

The necessity of using reconstruction light may be viewed as a disadvantage that hinders the exposition significantly, the reason for this being the fact that the reconstruction involves the necessity of using an external source of light that determines the legibility of a reconstructed hologram. (It applies especially to larger holograms which require a long distance between the source of reconstruction light and the hologram in order to keep the angle of dispersion as small as possible). In the examples discussed below the necessity of using reconstruction light was used as an advantage and a key element of an artistic object.

##### *1.1. Static reconstruction light and static hologram*



Figs. 33–34. Małgorzata Witaszak, untitled, 2012; hologram, window frame, broken glass; yellow reconstruction light.

A transparent white-light hologram, set in an old wooden window frame, of a sculpture of a woman looking out of a window is the principal element of the installation. The composition of the installation placed on the floor makes an impression of an incidental jumble. The beam of reconstruction light falls on the installation vertically, and the

hologram is slanted at an angle of  $34^{\circ}$  with the vertical so that the reconstructed image is visible only when the spectator is facing it in a strictly defined place. Using an effect of surprise is the main assumption of the installation. When the hologram is viewed at an angle preventing a projection, it makes an impression of a bland, dirty and dimmed window pane. The viewer can perceive it fully only when situated in the range of the projection.



Fig. 35. Karolina Machnicka, untitled, 2012; hologram, steel frame, brass; yellow reconstruction light.

The artistic realisation incorporates a brass schematic sculpture of a bird “staring” at its holographic reflection. The conception consists in a juxtaposition of a real object (a brass sculpture) with an illusionary object reconstructed in a hologram. It is an example of using a hologram as an element of a complex installation, combining various artistic fields (sculpture and holography) which are perfectly complementary in this configuration.

### 1.2. Movable reconstruction light and static hologram



Figs. 36–37. Jarosław Bogucki, *Fish Bowl*, 2010; hologram, steel, lighting system; green reconstruction light.

The artistic realisation is an installation combining a sculpture with holograms, where white-light holograms in shapes of irregular geometrical figures, set in a steel frame, are the principal element. The holograms employed are images of a steel sculpture of a fish belonging to the family *Ceratiidae*.

The installation uses the properties of a hologram that cause a serious limitation, namely the characteristics resulting from a demanding form of exposition, where an image appears in rigorously defined lighting conditions. In this installation the reproduction light is an inherent element of the whole in order directly to involve the viewer in the process of hologram reproduction by “merging” them with the lighting system. The viewers participating in the exhibition were given special helmets prepared for this event, with integrated light sources whose form alluded to the holographed fish, i.e. resembled their bioluminescent light source. It resulted in the image emerging from a hologram being determined by the location of the viewer due to the angle at which the image was viewed. The viewer therefore became an inherent and indispensable element of the installation.



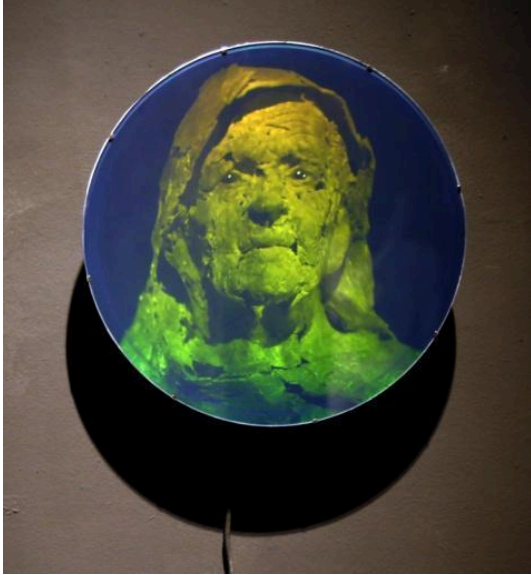
### 1.3. Static reconstruction light and movable hologram



Fig. 38. Jarosław Bogucki, *Between Illusion and Reality*, 2011; hologram, steel, synthetic resin, electric motor; yellow reconstruction light.

The installation has two basic elements, a sculpture and holograms, the sculpture showing a group of life-size figures, purposely represented roughly and schematically. These are representations of a woman, a man and a child: realistic, albeit without details. The sculpted figures have no heads. The group is surrounded by a movable metal band with fastened holograms of portraits of four persons – a woman, a child, a middle-aged man and an old man. A beam of light, an element of key importance, illuminates the group from one side only, frontally, while the rest of the composition is kept dark. The source of a concentrated light beam also makes the holographic images visible. The images, however, appear in turns only for a while, when the light beam illuminates one of the holograms rotating along with the band.





Figs. 39–40. Jarosław Bogucki, *Circle*, 2016; hologram, steel, synthetic resin, electric motor; white reconstruction light.

The hologram shows six separate sculpture portraits visible in turns during rotation. Each is reconstructed for a while, when the rotating hologram is situated at an appropriate angle in relation to the static reconstruction beam. A distinguishing characteristic of the hologram is the process of illuminating the white-light hologram consisting of six separate transmission holograms. During exposure the white-light hologram was rotated by 60 degrees in relation to the next transmission hologram.

## **2. Reconstruction light colour (reconstructing white-light holograms)**

White-light holograms are usually reconstructed by means of white light, consisting of electromagnetic waves of various lengths. It is advisable to reconstruct a monochromatic hologram with a reconstruction wave separated from white light (e.g. a green hologram can be reproduced with the light the same colour). The advantage gained by using an appropriate light colour, adjusted to a given hologram, results particularly from improving the contrast and limiting an excess of light causing a harmful lighting of the setting. Using this solution is particularly beneficial in some complex projects, where a hologram is an element of a larger spatial composition, while at the same time the reconstruction light is responsible for the appropriate illumination of the situation. Most of the examples presented in this text (apart from two exceptions) are reconstructed by means of a source of monochromatic light.

## **3. Reconstruction made with variable-colour light (rainbow holograms and coloured white-light holograms)**

### *3.1. Rainbow hologram illuminated with variable light*



Figs. 41–42. Joanna Sapkowska, *Little Pony*, 2013; rainbow hologram, toy; multicolour reconstruction light.

This artistic realisation shows a hologram of a model of an angular tunnel with an element of a vortex obtained by a rotation of every segment in relation to the preceding one, with a ready-made object, namely a Little Pony toy. The reconstruction light used in

the presentation changed smoothly from one colour to another in the full range of basic colours. When light of changing wavelengths was used, some elements of the image became visible, while others disappeared in horizontal stripes characteristic for rainbow holograms.

*3.2. White-light hologram, partly coloured, reconstructed with light of changing colour*

An effect similar to the one obtained with a rainbow hologram can be achieved by a reconstruction of a hologram partially coloured with light of changing colour.



White reconstruction light



Green reconstruction light



Red reconstruction light



Yellow reconstruction light

Figs. 43–46. Dorota Gralewka, untitled, 2015; white-light rainbow hologram; multicolour reconstruction light.

“I used a hologram in my installation concerning memories and memory. In a model of a size similar to the B2 paper size I placed photographs related to important facts or aspects of my life. The photographs were placed on pipes at different heights in order to emphasise the 3D effect of the hologram. I used holograms in various colours, therefore visible in different wavelengths. Some photographs could be seen only in green light,



some in red light, while others in orange light. Exposing the hologram, I used variable light so that photographs in particular colour were visible only for a moment, till the change of the light colour. Some photographs were closer to the viewer, others were seen in a greater distance, some were visible in a given moment, while others were not, which to me reflected the passing of human life and returning to memories, but also the feeling of elusiveness. An image appearing to have its weight and shape seems to be a real object, but on the other hand, it is completely inaccessible to our sense of touch, which results in a constant feeling of a possibility of a permanent contact, and at the same time a sense of insatiableness.”<sup>5</sup>

#### 4. Multiple illumination of a transmission hologram



Fig. 47. Jarosław Bogucki, *Double Portrait*.

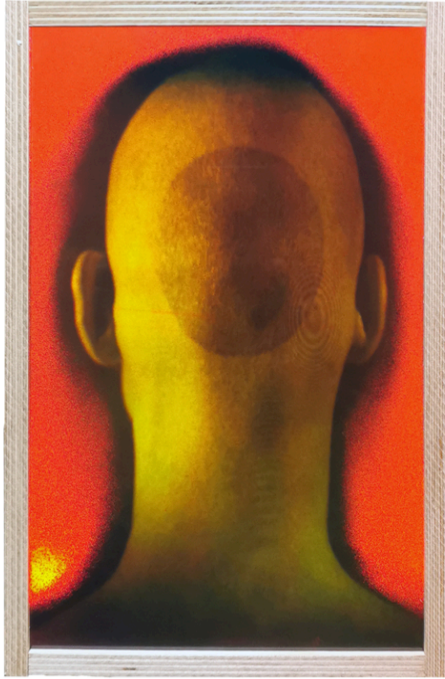
The hologram is a portrait of two persons “merged” into one. The method employed consists in double illumination of a transmission hologram of two different persons together with a change of the direction of the object beam: the beam illuminates in turns only one side of each model, from the left and from the right.

#### 5. Exploiting the transparency of holographic film

---

<sup>5</sup> Dorota Gralewska, commentary to her artistic realisation (2018).





Figs. 48–49. Szymon Zwoliński, untitled work (holographic self-portraits 1, 2) from the series *Burnout*, 2019–2020; hologram, moving mechanism, wooden frame.

The art object was made in a three-element cycle. It consists of wooden frames/boxes with a mobile mechanism placed inside to give the impression of a lit fire, and holograms. The hologram shows a male figure in a portrait shot from the front and (twice) from the back. The hologram also captures the characteristics of the portrayed person, such as a tattoo in which the portrayed person's face appears again. Within the image there are patches of colour resembling natural skin pigmentation, located in the upper frontal area and surrounding the outline of the figure. Thanks to the mobile mechanism used inside, an internal fire glows on the stains. It gives the impression of being real, but remains an optical illusion. The holograms showing the man were illuminated with yellow light.

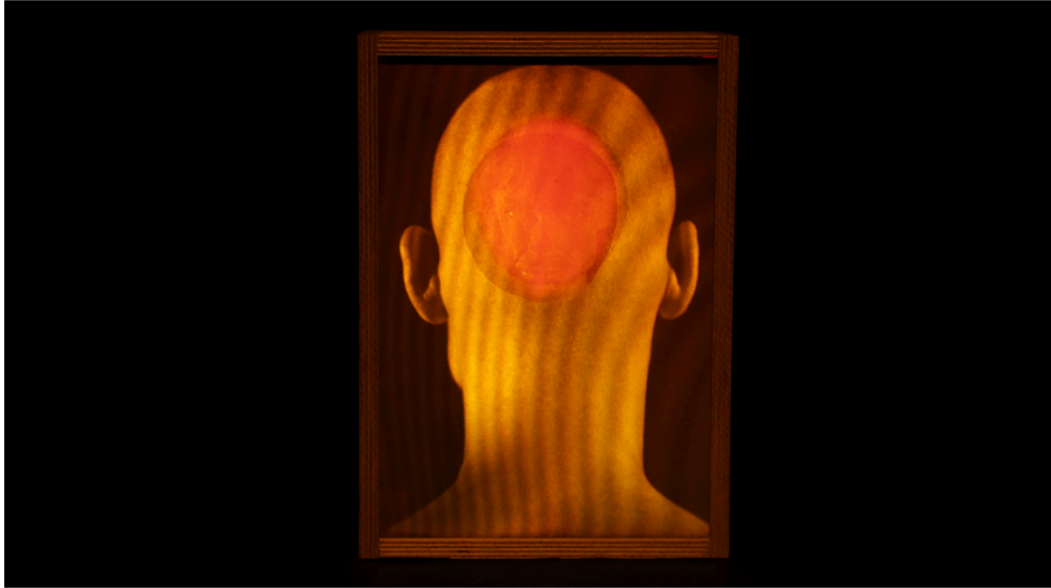


Fig. 50. Szymon Zwoliński, untitled work (holographic self-portraits 3) from the series *Burnout*, 2019–2020; hologram, moving mechanism, wooden frame.

This work, also consisting of three elements, uses the same materials, i.e. a wooden box with a mechanism, and a hologram. Here, the hologram shows a sculpture of a deformed male face, flattened and lying on its side. At the level of the eye sockets, the entire head is encircled by a belt made of geometric blocks that imitates a crown. The concealment of the figure's eyes and the unidentified belt surrounding the sculpture create unease. The optical illusion of burning, achieved through a mechanism used inside the box, was achieved by illuminating the art object with red light.





Fig. 51. Szymon Zwoliński, *Untitled (1)* from the series *I don't see, I don't speak, I don't hear*, 2019–2020; hologram, moving mechanism, wooden frame.

Another hologram of the series shows a sculpture of a deformed male face, in which a geometric stripe runs at the height of the ears. The projection imitating fire was achieved by means of a mechanism placed inside the installation. The hologram has been broken. The final hologram in the series is also a sculpted male head; here, a geometrised band made of modules is located at the height of the mouth.



Figs. 52–53. Szymon Zwoliński, *Untitled (2, 3)* from the series *I don't see, I don't speak, I don't hear*, 2019–2020; hologram, moving mechanism, wooden frame.



### **Concluding remarks**

Holography offers a wide range of creative possibilities. It is vital that we see how much we can obtain using this technology, and how little we know about it. This discipline has a huge potential, which I realise all the time, constantly discovering new ways of employing holograms. The examples presented above are but a tiny part of a wide spectrum of usages of holograms in artistic realisations exceeding the range of traditional methods. How a hologram will be used and in what context it will be placed depends on creativity and creative potential of a particular artist.

We should bear in mind the audience of artistic holographic realisations. Intensity of contact of the viewer with artistic realisations using holograms is often enhanced by an element of surprise resulting from ignorance of holography and fascination that arises at the first contact with this technology. Sometimes it can be used when planning an artistic realisation and appropriate exposition, as it imbues artistic objects with some magical aspect. Sadly, as a hologram is perceived by the average viewer as an unusual and surprising form, it quite often prevents going beyond the surface layer of an artistic realisation in order to attain the level of an analysis and more profound interpretation. When a viewer focuses merely on the external, formal aspect of an image, they regard a hologram as a curiosity and do not make an effort to interpret the intentions of an artist. Artistic realisations encountered by viewers with such an approach are therefore not perceived as art and reduced to meaningless objects intended to provide surprise and entertainment, without any intention to evoke reflections upon the world and man living in it.

To me a hologram is far more than a faithful copy of a fragment of the real world. It gives us a possibility of stopping the time, capturing and recording a real situation in a form of a frozen, lifeless and motionless image which can be viewed without any limitations. Facing a hologram, one can have an impression of a full control over time. This illusion enhances an impression of encountering a different entity that is ruled by laws at variance with ours, a window providing an insight into a different dimension, into a world deprived of multitude of colours, monochromatic, but at the same time determined by one intense colour enhancing the sense of unreality. It is precisely this property that makes a hologram a very attractive artistic medium. This feature, however, must not be the only criterion taken into account when considering a hologram as an artistic means of expression. An artist has to find a method of employing a hologram where it is the only possible form of artistic realisation.

## DENISYUK HOLOGRAMS — PRACTICAL APPLICATION

The Holographic Lab at the Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan has the equipment that makes it possible to make the so-called Denisyuk holograms even without any professional holographic apparatus. Using a relatively simple optical system and a commonly available pointer laser, small holograms can be made. (For a detailed description of Denisyuk holograms, see *Holography*, subsection 8, *Reflective and Denisyuk Holograms*).

### 1. Construction of an exemplary set used to record Denisyuk holograms

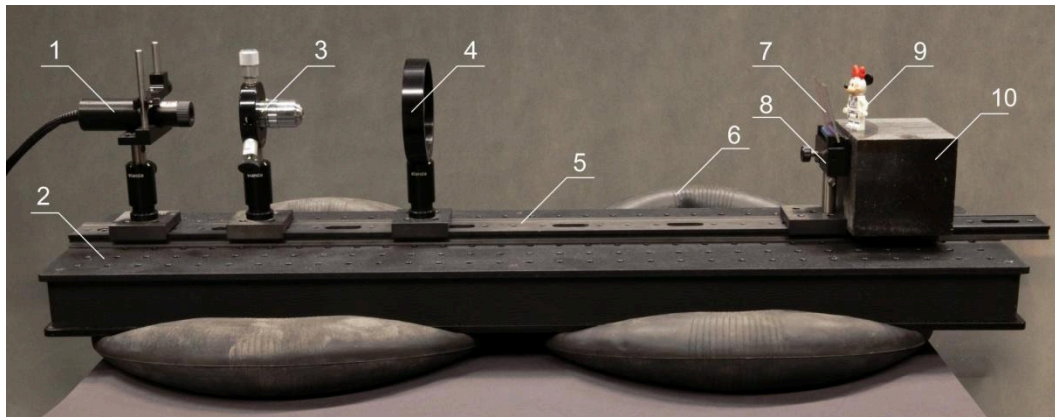


Fig. 54. An exemplary set used to record Denisyuk holograms: 1. a diode laser (pointer type), 2. the optical table top, 3. a microscope lens, 4. a plane-convex lens, 5. an optical rail, 6. a vibration absorber (e.g. a bike wheel tube), 7. a glass plate with holographic film, 8. a mounting bracket, 9. a holographed object, 10. a stable base (e.g. granite cube).

### 2. The recording material: Color Photopolymer Bayfol® HX 200

We use a photosensitive photopolymer film that can be used to make holograms to be viewed in white light (reflective holograms). Bayfol HX 200 can be used when using laser light in the visible wavelength range, i.e. 440–680 nm. No additional processing is needed to make a hologram, i.e. neither wet processing (i.e. no photochemical process is used) nor thermal treatment. After the hologram has been exposed, however, exposure to short-wave light (by means of a UV lamp or by exposure to sunlight) is necessary to remove the sensitivity of unexposed areas to light. Bayfol HX 200 consists of three layers of a substrate, a photosensitive photopolymer, and a protective top film. The substrate is a cellulose triacetate (TAC) film, and the protective cover film is a polyethylene (PE) film. The protective film can be removed from the photopolymer. The product can be used for various types of volumetric holograms (see <https://www.geola.com/product/photopolymer/>).

Photopolymer film is an excellent alternative to silver-halide holographic films, which require relatively complex, ‘wet’ processing. Thanks to photopolymers, the recording effect does not require any additional processes after the hologram has been exposed, apart from brief exposure to UV waves. It means that the final effect is obtained immediately after the recording of the hologram. An additional advantage is the possibility of making holograms in three colours or one of the chosen colours, depending

on the wavelength of the laser light used for recording — green, red or blue.

### *2.1. Preparation of material for holography*

Thin glass plates of the final size need to be prepared. The protective film must then be removed from the cut pieces of photopolymer film and the film applied to the glass by means of a soft photographic roller. It is very important to do this in an environment that is completely free of dust and dirt. It is imperative that the surface of the glass to which the polymer film is applied is clean and free of any debris, even the tiniest, as the hologram may not be recorded where the particles are present, which will result in a 'hole' in the image. The excess film beyond the edge of the glass should then be cut off. Once applied, the film adheres perfectly to the glass surface. During all operations, particular attention should be paid to any contamination that causes air bubbles to form between the film and the glass, as this is where the image will not be recorded.

Due to the sensitivity of the film to light, all operations must be carried out in darkroom conditions and the laminated plates must be protected from light. Faint illumination of the darkroom with a source of long-wave radiation (dark-red lamp) of the lowest possible intensity is permitted.



Figs. 55–57. Preparation of materials. From left: a set of basic tools, the process of applying a sheet of photopolymer material to a glass base, trimming the excess film to the desired size.

## **3. The process of recording a hologram**

The most important requirement is to stabilise the recording set as much as possible. The only way to deal with vibrations is to use as a base a material that effectively absorbs any microshocks. In our case, as the simplest and proven method, partially air-filled inner tubes are used, on which a tabletop with a hologram recording system is placed. Despite using the above vibration reduction method, care must be taken to ensure that the recording is carried out in a quiet location, away from shocks and vibrations that can come from industrial facilities, traffic, or even farm equipment and power tools. Failure to observe these requirements will prevent the hologram from being properly recorded. As with the processing of photographic materials, due to the photosensitivity of holographic materials, all activities related to the preparation of the photopolymer film before the exposure should be carried out at limited light (darkroom conditions).

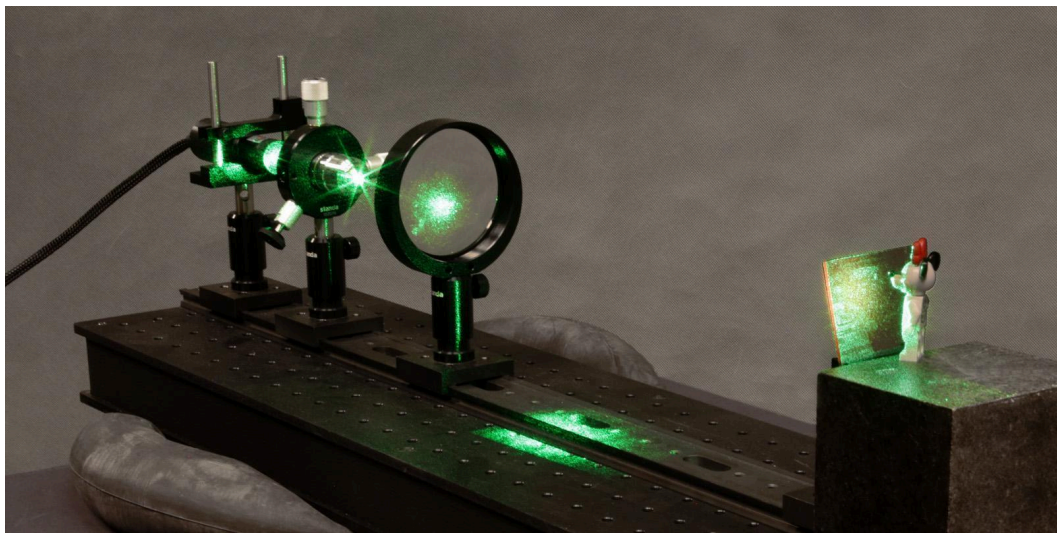
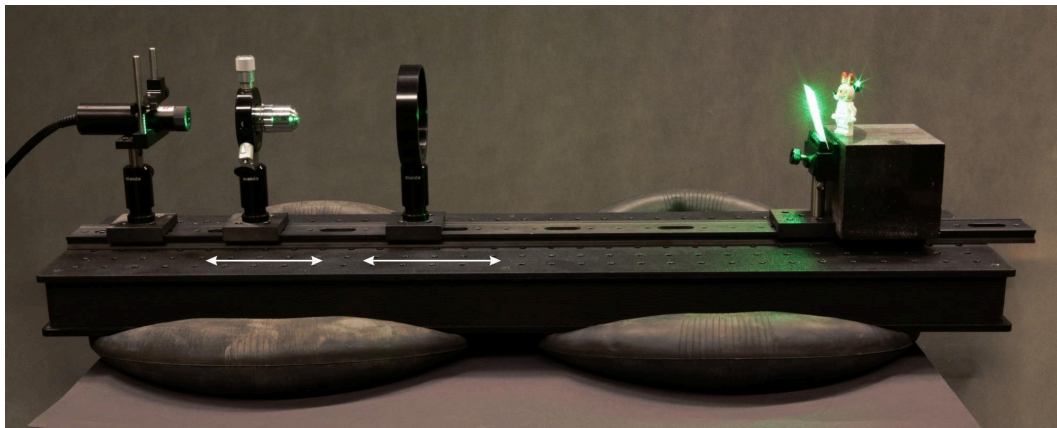
### *3.1. Preparation of the scene*

On a stable basis, the holographic object should be placed as close as possible to the photopolymer film (it is desirable that the object even touches the surface of the

recording material). Holographed objects should be made of materials that guarantee a stable position. Fairly massive, heavy objects are best. When lighter objects are used, it is advisable to fix them firmly to the base. Objects should also be as bright as possible to achieve the best possible image reconstruction. This is because objects and parts of objects with a low reflectance, i.e. dark, will be less visible on the hologram, which should be remembered.

### 3.2. Laser beam correction

By placing a white screen cut from paper in the final format of the hologram, in the holder for the plate with photopolymer film, the correct position of the beam can be set. By adjusting the position of the microscope lens and the flat-convex lens, we can select the degree of dispersion and centre the laser beam in the axis of the hologram. In practice, care should be taken to illuminate the holographic material as evenly as possible.



Figs. 58–59. Centring the laser beam in the axis of the hologram.

### 3.3. Placing the glass plate with photopolymer film in the holder

A glass plate with photopolymer film is placed in place of the paper screen, with the film



side facing the holographed object.

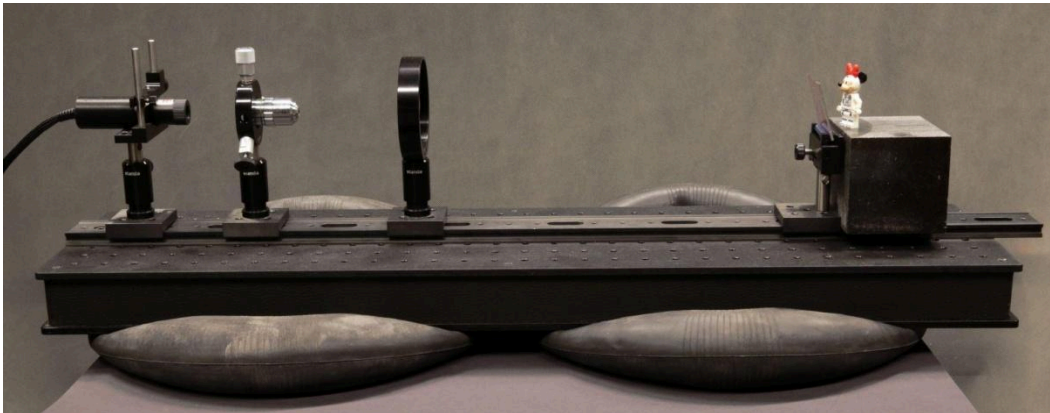


Fig. 60. A set used to record holograms.

### 3.4. Hologram exposure

For reasons of beam stability, the exposure time should not exceed a few seconds or so. This should be adjusted experimentally. During the practical session, the instructor will give instructions on the exposure time.

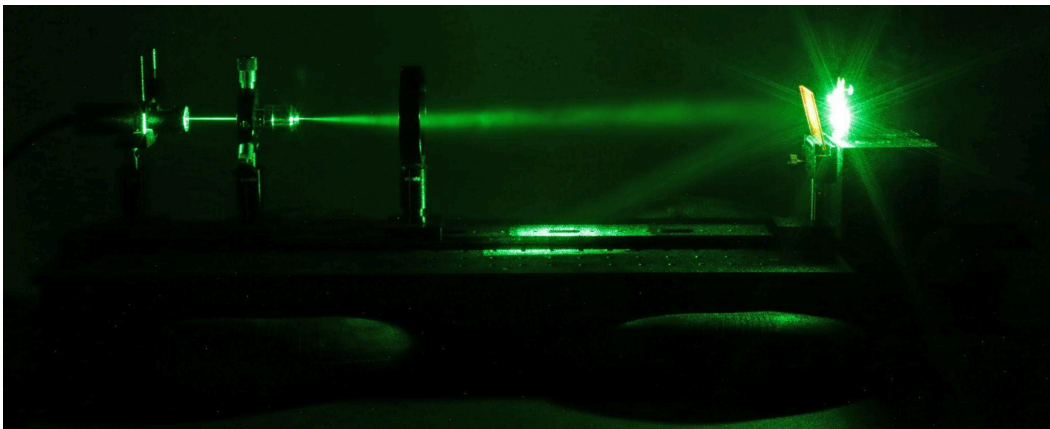


Fig. 61. Exposure.

### 3.5. Fixing a hologram

The image recorded on the photopolymer film is fixed by brief exposure to UV waves or sunlight.



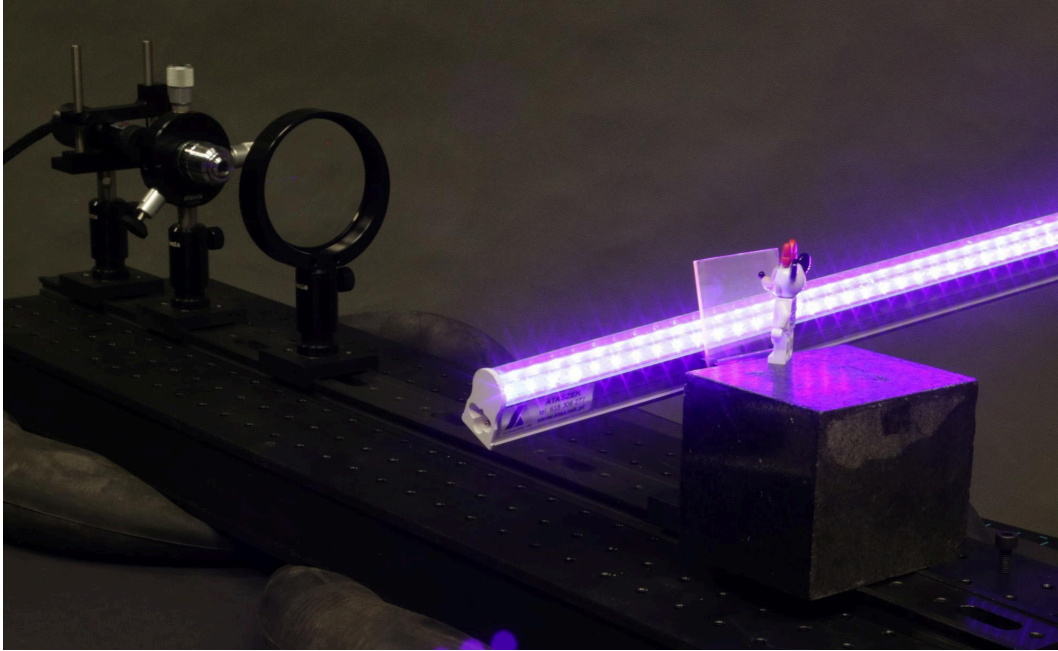


Fig. 62. Fixing a hologram.

### 3.6. Hologram protection

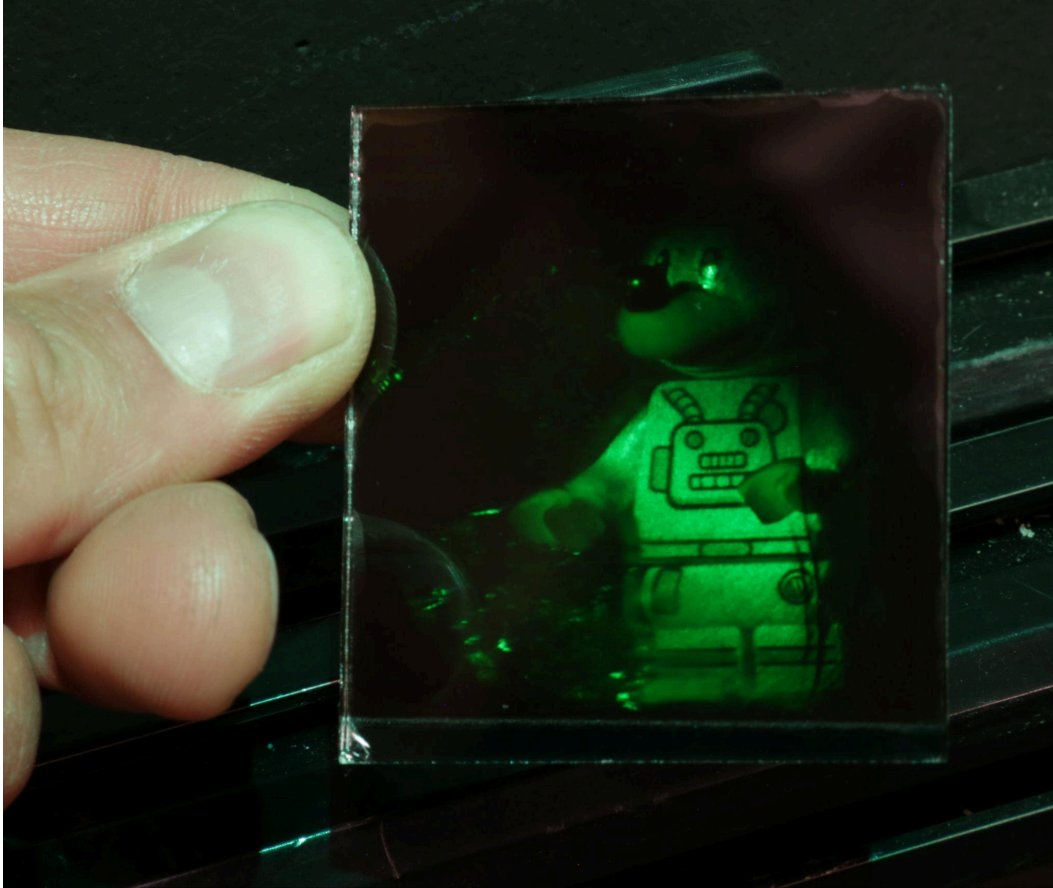
Photopolymer film is susceptible to dirt and damage. A practical solution is to use black plotter film as protection — and also as a background for the hologram. It should be applied evenly and without contamination to the side of the glass plate with the photopolymer material. This film is applied similarly to the way a photopolymer film is applied on the glass.



Figs. 63–64. Protecting a hologram.

### 3.7. Example hologram

Exposure time: 6 seconds.



Figs. 65–66. An example hologram.

### 3.8. Reconstruction of a hologram

The hologram recorded in the presented system is to be reconstructed in white, incoherent light. First of all, care should be taken to ensure that the lighting for reconstruction is as close to spotlight as possible. Sunlight is best for this, but single LEDs (white) placed as far away from the hologram as possible will also work well. Non-point light sources, such as large luminescent planes, lightbulbs with large bulbs, or modular,

multi-connector LED lamps will give a blurred or multiplied image. It should be remembered that this is not a defect in the hologram, but only the result of an inadequate reconstruction method (see chapter 8).

#### 4. The use of Denisyuk holograms in artistic work, presented on select examples

##### 4.1. Multiplications of a hologram

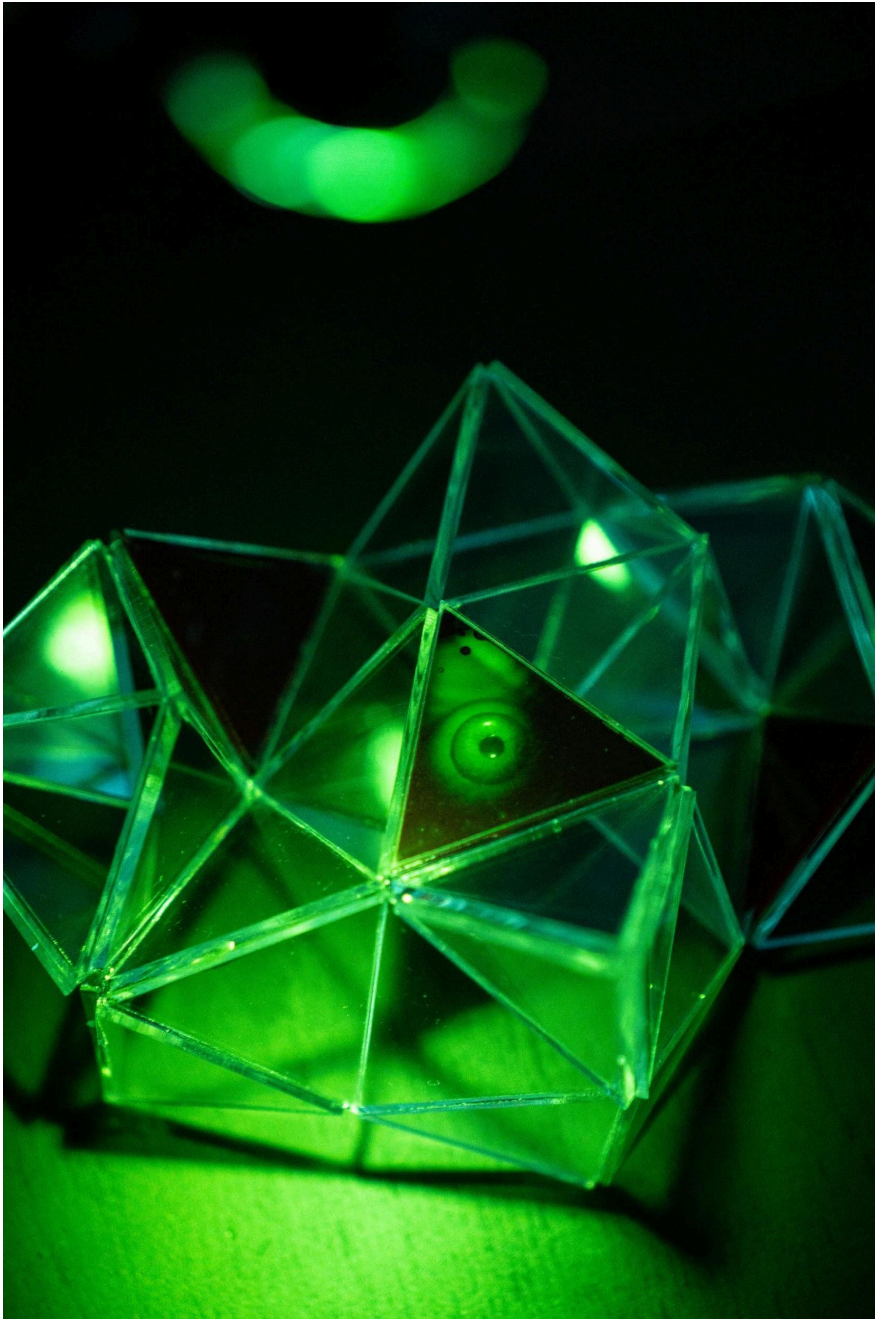


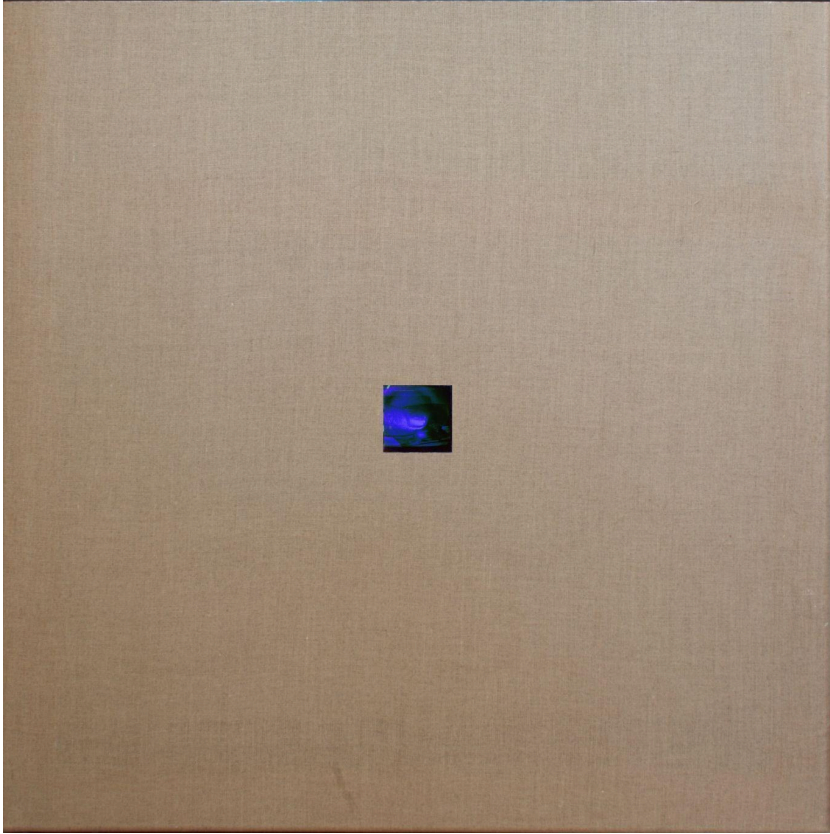
Fig. 67. Olga Kucel, *Artifacts*, 2023, acrylic glass, hologram.

This is a spatial object made of triangular plates of transparent acrylic glass. Holograms of an artificial eyeball are placed on the elements of the work. The art object is an example of the use of a duplicated hologram as an element of an overall spatial composition. By placing the holograms in the individual elements of the geometric structure, the impression of the spatiality of the solid is further enhanced by the three-dimensionality, the depth of the holographic image. An important element of the work is the juxtaposition of the austere, stark form of the transparent object with the representation of eyes that stare into space and arouse anxiety.

#### **4.2. Interdisciplinary art objects**

When a holographic image is used skilfully, it blends well in artwork made in various artistic fields. The juxtaposition of a three-dimensional hologram with a two-dimensional representation opens up new possibilities for artistic exploration. However, it should be remembered that despite the three-dimensional depth, a hologram is a two-dimensional object.









Figs. 68–69. Jakub Matuszewicz, *Self-portrait*, 2023; diptych: oil on canvas, painting canvas, hologram 5×5 cm.

Placed in the centre of the canvas, the hologram shows a thumb holding a painting palette in the manner characteristic for an artist. The painted portion of the painting depicts a section of the palette and a hand mixing paint with a brush.





Figs. 70–71. Jakub Matusewicz, *Self-portrait*, 2023; diptych: oil on canvas, painting canvas with a hinge, hologram 5×5 cm.

The realization was made in traditional painting techniques combined with a hologram placed in the centre of the composition. The hologram shows the tip of a brush, the primary painting tool. The hologram complements the image depicting the author captured while priming the canvas.

“In paintings whose main subject is the image of the painter (my self-portrait), I address the problem of the presence of an object or person. Intending to paint a realistic self-portrait, we must use a mirror, the author must be in front of the painting. In order to make a photograph, we need to have the model in front of the lens, and to make a hologram, we need objects right behind the holographic film. Two things are needed each time: glass (the mirrors of the lens, the glass on which the hologram is recorded) and presence. The juxtaposition of the hologram, which is a moving image, with painting based on photographs, makes a quite peculiar relationship. In both cases, there is an imitation: either of the hologram, or of the space of ‘the box that contains concrete objects.’”

(the author’s commentary)

#### **4.3. Juxtaposition of ready-made objects with a holographic representation**

Holography provides an opportunity to record ephemeral objects, prone to deterioration and effects of the passage of time. In the past it was used to present museum objects, the condition of which made it impossible to display in the original. The image captured on holographic film is an exact reproduction of the real model, the only difference being the lack of its physical form. It is a visual copy of it frozen in time.



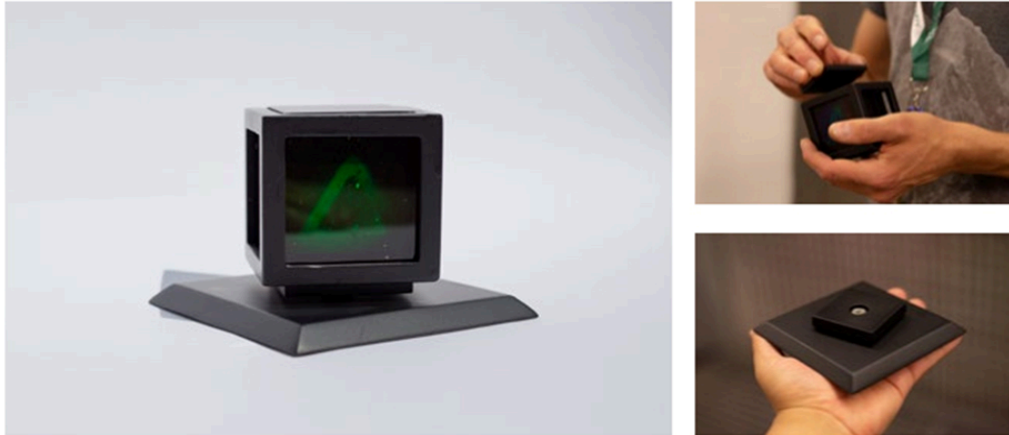
Figs. 72–73. Magdalena Czapiewska, untitled, 2023; tree trunk, hologram 5×5 cm.

“The object is a combination of the natural world and technology. The dead trunk comes to life by adding holograms to it, which give the impression of movement and life under the bark. The holograms show objects found in the forest — lichens and cocoon-like plants. Although the structures seen in the holograms in nature are on the bark or just wrap around the trees, in the ‘untitled (trunk)’ object they give the impression of belonging to the inner layers of the tree.”

(the author’s commentary)

#### **4.4. Using Denisyuk holograms in art objects with an educational function**

One unconventional use for Denisyuk holograms was found in the 2022/23 academic year by student Rafael Alejandro Muñoz Osorio, who made an educational art object using holograms of this type as part of his master’s thesis on improving visual-spatial skills and the well-being of children with ADHD.



Figs. 74–76. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, *ADHD and Holographic Intervention*, 2022–23; Denisjuk hologram, wood, paint.

As Rafael Alejandro Muñoz Osorio notes in his master’s thesis: “The visual-spatial sense is an essential aspect of cognitive processing and can play a key role in understanding and managing attention in children diagnosed with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). Holograms offer an engrossing and interactive visual experience by providing viewers with the ability to perceive images from different angles; thus stimulating the visual-spatial sense in a unique and engaging way.”<sup>6</sup>

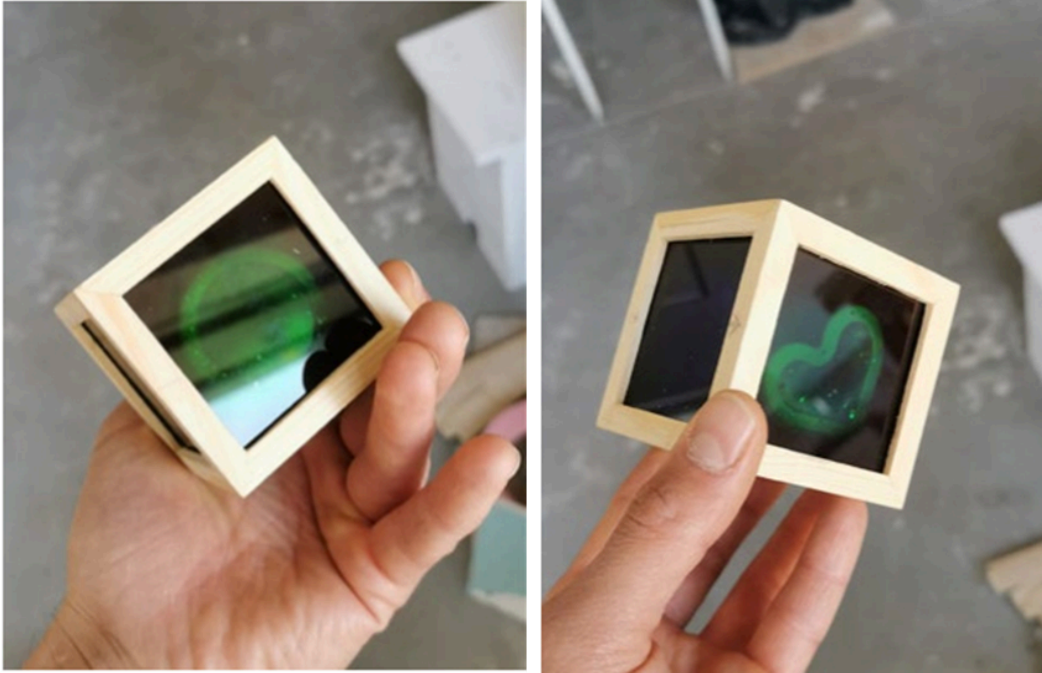


Fig. 77. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, *ADHD and Holographic Intervention*, 2022–2023; a Denisjuk hologram, wood, paint.

<sup>6</sup> R. Alejandro Muñoz Ostrio, *ADHD and Holographic Intervention: Enhancing Visual-Spatial Skills and Overall Being of Children with ADHD* (master’s thesis), p. 7.



The object contains as many as four Denisyuk holograms. During the interaction, the user analyzes them individually, taking advantage of the captivating visual experience that can be obtained only by means of a hologram. An additional advantage of the object is that it can be set in motion at a pace chosen by the user. This results in stimulation of attention, increased sensitivity of the visual-spatial sense and potential mitigation of some of the long-term cognitive effects of ADHD.



Figs. 78–79. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, *ADHD and Holographic Intervention*, 2022–2023; a Denisyuk hologram, wood (as photographed before being painted).

Originally from Guatemala but studying in Germany, Rafael Alejandro Muñoz Osorio decided to make this type of an art object because during his BA course he volunteered for people with refugee experience, among whom he also met children with ADHD. He became interested in how beautifully different we are and how creative work can improve the functioning of others.



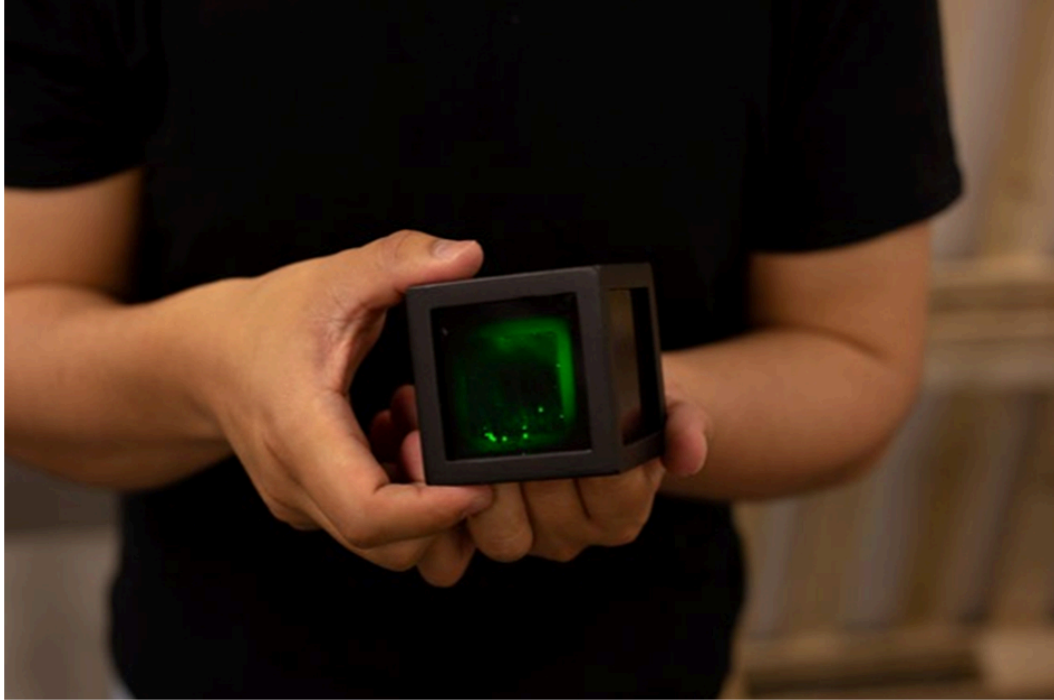


Fig. 80. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, *ADHD and Holographic Intervention*, 2022–2023; a Denisyuk hologram, wood, paint (the educational art object held by the author).

## **GLOSSARY**

**axial holographic recording** — during the recording two light beams (the object beam and the reference beam) are emitted from the same point

**coherence of light** — preservation of a constant phase difference during the propagation

**continuous emission laser** — a laser that continuously emits light

**off-axis holographic recording** — during the recording two beams of light (reference and object) are emitted from different points

**parallax** — the ability to view the hologram from different points; vertical parallax — the ability to view the hologram from different points higher or lower in relation to it; horizontal parallax is a similar property horizontally

**pulsed laser** — a laser that emits light for a very short time (the order of nanoseconds)

**rainbow hologram** — the name comes from the changing colour of the hologram, depending on the angle of observation; it is reproduced by means of white light

**volumetric hologram** — a hologram with a thick layer of photosensitive material

**wave propagation** — the spreading of a wave during emission

## SOURCES OF PHOTOGRAPHS USED IN THE TEXT

- Fig. 1. Holographic image projection used in the film *Star Wars: Part 4 — A New Hope* (source: <https://www.starwars.com/news/6-ways-holograms-play-an-important-role-in-star-wars>; accessed 18 August 2023).
- Fig. 2. A light projection method used to make an image of a *Star Wars* vehicle in space (source: <https://www.wired.com/2008/06/usc-lab-creates/>; accessed 18 August 2023).
- Fig. 3. A 500-zloty banknote of the National Bank of Poland, in which the holographic security element is used (source: <https://nbp.pl/banknoty-i-monety/banknoty-obiegowe/500-zl/>; accessed 18 August 2023).
- Fig. 4. A bank card security hologram (source: [https://static.turbosquid.com/Preview/000293/674/U0/credit-card-hologram-3d-obj\\_D.jpg](https://static.turbosquid.com/Preview/000293/674/U0/credit-card-hologram-3d-obj_D.jpg); accessed 18 August 2023).
- Fig. 5. Women's garment made of fabrics using the physical phenomenon of diffraction (source: [https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1os9cLXXXXatXVXXq6xXFXXk/Low-key-luxury-compact-fluorescent-silver-coating-knitted-fabrics-holographic-cloth-laser-Silvering-stretch-knit-fabric.jpg\\_640x640.jpg](https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1os9cLXXXXatXVXXq6xXFXXk/Low-key-luxury-compact-fluorescent-silver-coating-knitted-fabrics-holographic-cloth-laser-Silvering-stretch-knit-fabric.jpg_640x640.jpg); accessed 18 August 2023).
- Fig. 6. A skateboard with a diffraction layer (source: <https://www.snupdesign.com/wp-content/uploads/2017/02/Holographic-Skateboard-3.jpg>; accessed 18 August 2023).
- Fig. 7. A multi-exposure hologram made with a pulsed laser: Margaret Benyon, *Tigirl* (source: [holocenter.org](http://holocenter.org)).
- Fig. 8. A rainbow hologram viewed in white light (source: Massachusetts Institute of Technology).
- Fig. 9. Jarosław Bogucki, *Narcissus* (photograph from the author's archive).
- Fig. 10. Jarosław Bogucki, *Word for Word* (photograph from the author's archive).
- Fig. 11. Szymon Zwoliński, *Untitled* (holographic self-portraits 1, 2) (photograph from the author's archive).
- Fig. 12. Professor Ventsi Sainov showing a Denisyuk hologram of a pair of nineteenth-century pistols used by the Russian Army (source: <http://www.worldsworsttourist.com/WWTBulgaria05.htm>; accessed 18 August 2023).
- Fig. 13. Mieczysław Wolfke (source: <https://s.ciekawostkihistoryczne.pl/uploads/2016/05/Mieczys%C5%82aw-Wolfke.jpg>; accessed 18 August 2023).
- Fig. 14. Dennis Gabor (source: <https://cultura.hu/wp-content/uploads/2015/06/cultura-gabor-denes-oktat.jpg>; accessed 18 August 2023).
- Fig. 15. Emmett Leith and Yuris Upatnieks (source: <https://eecsnews.engin.umich.edu/wp-content/uploads/sites/2/2019/09/leith-2.jpg>; accessed 18 August 2023).
- Fig. 16. The Geola holographic printer (source: [www.geola.com](http://www.geola.com)).
- Figs. 27–29. The Holography Lab at the Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan (photographs from the authors' archives).
- Fig. 30. The Holography Lab at the Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan (photograph by Ewa Bielańczyk).
- Figs. 31–32. Diagram showing transmission hologram and white-light hologram exposure in the Holographic Laboratory of the Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan (photographs from the authors' archives).
- Figs. 33–34. Małgorzata Witaszak, untitled (photographs from the author's archive).
- Fig. 35. Karolina Machnicka, untitled (photograph from the author's archive).
- Figs. 36–37. Jarosław Bogucki, *Fish Bowl* (photographs from the author's archive).
- Fig. 38. Jarosław Bogucki, *Between Illusion and Reality* (photograph from the author's archive).
- Figs. 39–40. Jarosław Bogucki, *Circle* (photographs from the author's archive).
- Figs. 41–42. Joanna Sapkowska, *Little Pony* (photographs from the author's archive).
- Figs. 43–46. Dorota Gralewska, untitled (photographs from the author's archive).
- Fig. 47. Jarosław Bogucki, *Double Portrait* (photograph from the author's archive).
- Figs. 48–49. Szymon Zwoliński, untitled (photographs from the author's archive).

Fig. 50. Szymon Zwoliński, untitled (photograph from the author's archive).  
Fig. 51. Szymon Zwoliński, *Untitled (1)* (photograph from the author's archive).  
Figs. 52–53. Szymon Zwoliński, *Untitled (2, 3)* (photographs from the author's archive).  
Fig. 54. An exemplary set used to record Denisyuk holograms (photograph from the archive of the Studio 5: Spatial Imaging at the UAP).  
Fig. 55–57. Preparation of materials (photographs from the archive of the Studio 5: Spatial Imaging at the UAP).  
Figs. 58–59. Centring the laser beam in the axis of the hologram (photographs from the archive of the Studio 5: Spatial Imaging at the UAP).  
Fig. 60. A set used to record holograms (photograph from the archive of the Studio 5: Spatial Imaging at the UAP).  
Fig. 61. Exposure (photograph from the archive of the Studio 5: Spatial Imaging at the UAP).  
Fig. 62. Fixing a hologram (photograph from the archive of the Studio 5: Spatial Imaging at the UAP).  
Figs. 63–64. Protecting a hologram (photographs from the archive of the Studio 5: Spatial Imaging at the UAP).  
Figs. 65–66. An example hologram (photographs from the archive of the Studio 5: Spatial Imaging at the UAP).  
Fig. 67. Olga Kucel, *Artifacts* (photograph from the author's archive).  
Figs. 68–69. Jakub Matusewicz, *Self-portrait*, 2023; diptych: oil on canvas, painting canvas, hologram 5×5 cm (photographs from the author's archive).  
Figs. 70–71. Jakub Matusewicz, *Self-portrait*, 2023; diptych: oil on canvas, painting canvas with a hinge, hologram 5×5 cm (photographs from the author's archive).  
Figs. 72–73. Magdalena Czapiewska, untitled, 2023; tree trunk, hologram 5×5 cm (photographs from the author's archive).  
Figs. 74–80. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, *ADHD and Holographic Intervention* (photographs from the author's archive).

The diagrams not included in the list are by the authors of the study.

Iceland  
Liechtenstein  
Norway grants



Programme Operated by:  
**f r s e**  
Foundation for the Development  
of the Education System

# **ARTISTIC HOLOGRAPHY**

**NORSK VERSJON  
(AI-OVERSETTELSE)**

PhD. / Jarosław Bogucki (higher doctorate)  
PhD. / Marek Sutkowski Eng.  
PhD. / Szymon Zwoliński



## HOLOGRAFI

En veiledning om hvordan man bruker holografisk teknikk for kunstneriske formål

### 1. Hva er holografi

Brukt i mange år, har termen holografi funnet veien inn i hverdagsvokabularet. Imidlertid er betydningen av ordet ikke alltid identisk med dets sanne definisjon. Dette skyldes at termen holografi tilhører begrepene brukt innen optikk og beskriver en metode for å registrere informasjon om en tredimensjonal romscene på en troverdig måte. Encyclopaedia Britannica definerer det som følger:

Holografi, en metode for å skape et unikt fotografisk bilde uten bruk av linse. Den fotografiske registreringen av bildet kalles et hologram, som ser ut til å være et ugjenkjennelig mønster av striper og virvler, men som — når det blir opplyst av koherent lys, som ved hjelp av en laserstråle — organiserer lyset i en tredimensjonal representasjon av det opprinnelige objektet.

(<https://www.britannica.com/technology/holography>; besøkt 31. mars 2023)

Den encyklopediske definisjonen virker komplisert. Det er derfor ikke helt klart hva et hologram egentlig er. Inntil videre kan vi anta, i tråd med den siterte beskrivelsen fra Encyclopaedia Britannica, at holografi er en metode for å lage en tredimensjonal representasjon av et objekt eller en scene ved hjelp av en lysstråle. Det er derfor en måte å registrere et bilde på samtidig som man bevarer dets tredimensjonalitet, eller romlighet og dybde. Med andre ord tillater holografi oss å vise en fast form som vi kan oppfatte med synssansen vår. Det kan derfor betraktes som en immateriell skulptur. Det skal imidlertid legges til at holografi, eller rettere sagt visse holografiske teknikker, mer nøyaktig gjør det mulig å bruke noen uttryksmidler som er vanskelige eller til og med umulige å oppnå i skulptur.

Det er også verdt å nevne her hvordan ordene holografi og holografisk vanligvis forstås. I det enkleste tilfellet sees de som synonymer for begrepene romlig og troverdig. Hvis vi bare ser på definisjonen, kan dette til en viss grad ikke benektes. Det er imidlertid verdt å huske at dette bare er en tilnærming, en mental snarvei, og derfor bør man nærme seg de mange dagligdagse, markedsføringsmessige og reklamemessige bruksområdene av disse termene med passende forsiktighet.

### 2. Har du sett et hologram?

I en verden der de nyeste teknologiske løsningene omgir oss overalt, er det svært sannsynlig at nesten alle som har besøkt en avansert eller fremvoksende økonomi minst én gang, har kommet over holografi og hologrammer. Det bør legges til at som et resultat av bred tilgang til informasjon, er nesten alle — uavhengig av opprinnelse eller bosted — kjent med minst konseptet holografi.

Det mest spektakulære eksempelet på kontakt med holografi er den kjente scenen fra filmen Star Wars: Del 4 — Et nytt håp, der Luke Skywalker gjenskaper et 3D-bilde av prinsesse Leia lagret i minnet til roboten R2-D2 med en melding til Obi-Wan Kenobi (se Fig. 1). Denne projeksjonen gjentas i denne delen av filmsagaen, og holografiske bilder er også brukt i andre episoder av Star Wars-serien.

En kort forklaring skal gis til leseren her. Selv om vi her har å gjøre med ideen om en holografisk rekonstruksjon av en bestemt scene, forblir selve projeksjonsmetoden vist i denne filmen utilgjengelig for oss. Selvfølgelig pågår forskningsarbeid for at denne fantasien fra 1977 skal kunne realiseres, og man kan nesten være sikker på at dette snart vil oppnås. For vi vet allerede hvordan man lager tredimensjonale lysbilder i rommet (volumetriske teknikker — se Fig. 2), selv om det må legges til at disse metodene fortsatt er forskjellige fra visjonen sett i filmen. Vel, la oss vente litt lenger.

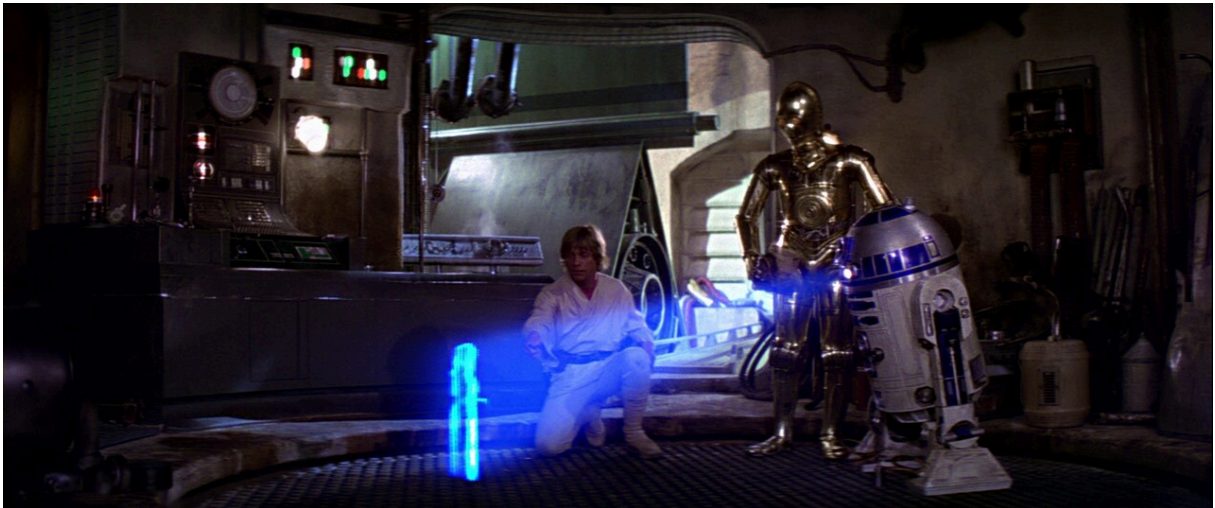


Fig. 1. Holografisk bildeprojeksjon brukt i filmen Star Wars: Del 4 — Et nytt håp.

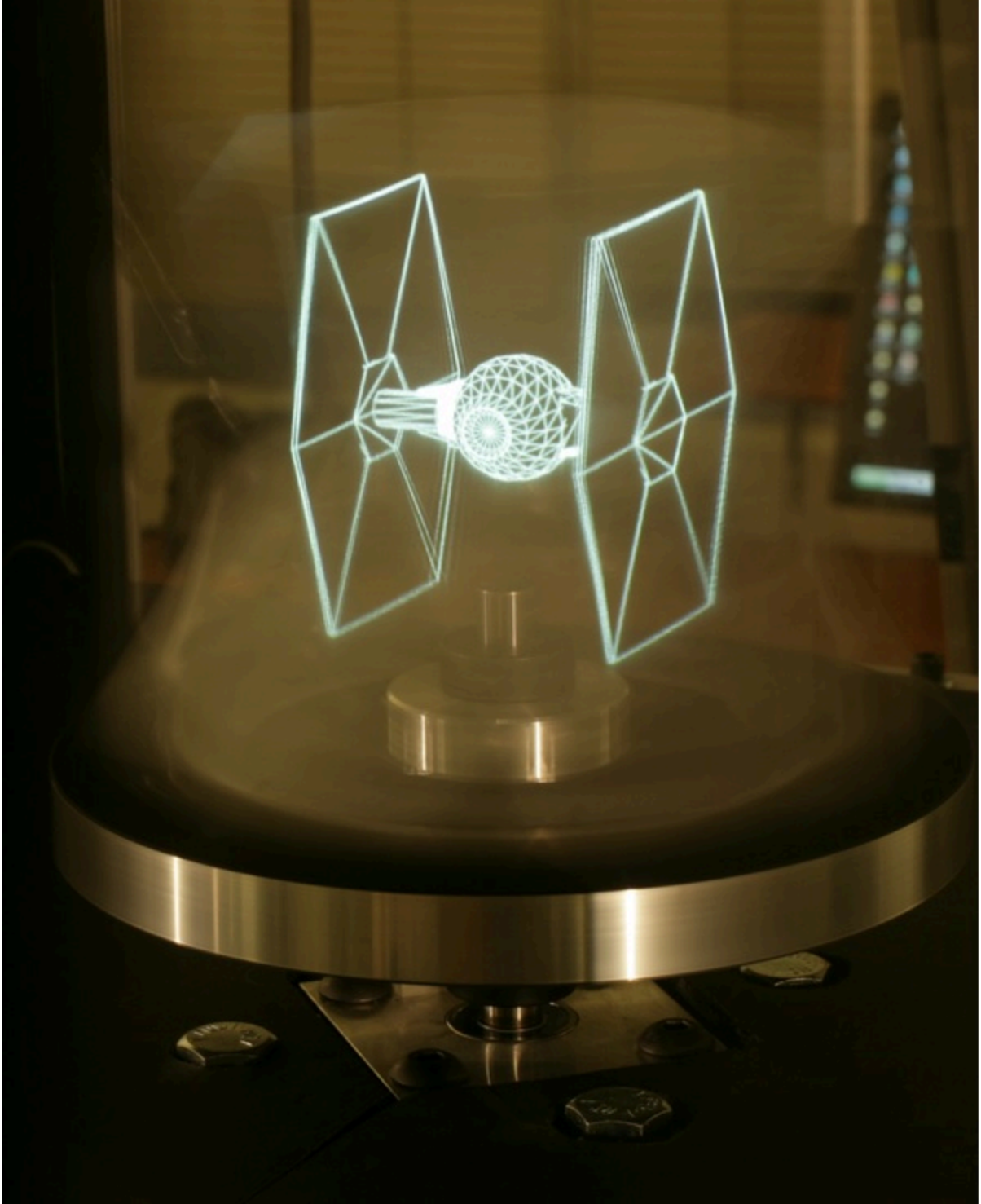


Fig. 2. En lysprojeksjonsmetode brukt for å lage et bilde av et Star Wars-fartøy i rommet. I dette tilfellet ble en roterende speil og en ikke-kohærent lysprojeksjon brukt.

Et annet eksempel på bruk av holografi i hverdagen er populære løsninger som forhindrer produkter fra uønsket kopiering eller forfalskning. Dette inkluderer beskyttelser for sedler, bankkort, billetter, osv. Vanlige løsninger inkluderer striper og

områder som ofte inneholder romlig informasjon registrert i form av et holografisk bilde. For eksempel viser Fig. 3 en holografisk stripe på en polsk 500-zloty-seddel. Tilsvarende hologrammer kan finnes på bankkort, billetter eller klistremerker brukt på mange produkter.



Fig. 3. En 500-zloty-seddel fra Den nasjonale banken i Polen, der et holografisk sikkerhetslement brukes — stripen markert med nummeret 2.

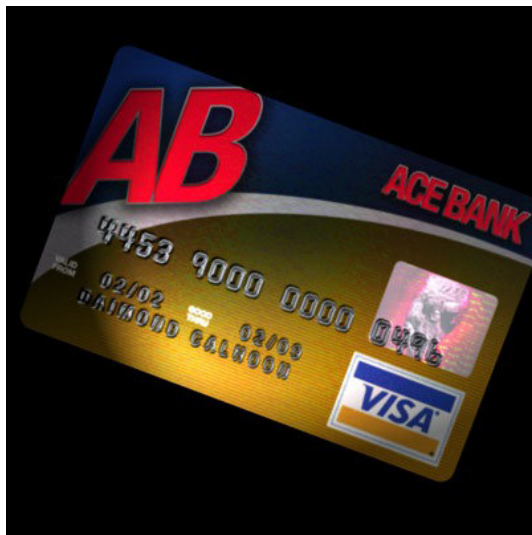


Fig. 4. Et sikkerhetshologram på en bankkort.

Hverdagsprodukter basert på diffraksjon, det vil si avbøyning av lys som følger med prosessen med å rekonstruere et holografisk bilde, blir stadig vanligere. Dette inkluderer klær, vesker, belter, nøkkelringer og til og med skateboard. Disse er ikke nøyaktig hologrammer, men prinsippet for deres funksjon er identisk med det til et hologram, derfor betraktes de generelt som et eksempel på holografisk teknikk.





Fig. 5. Kvinneplagg laget av stoffer som bruker det fysiske fenomenet diffraksjon, det såkalte holografiske stoffet.



Fig. 6. Et skateboard med et diffraksjonslag, det såkalte holografiske skateboardet.

### 3. Billedholografi i kunstnerens daglige liv

Neste steg i presentasjonen av holografisk teknikk er en diskusjon om dens mest interessante anvendelse, nemlig billedholografi, inkludert kunstholografi. I motsetning til



de ovennevnte eksemplene, fokuserer vi her på romlig gjenskaping av et registrert objekt eller scene, laget på en måte som gir betrakteren inntrykk av å se på et ekte objekt eller en scene. Et slikt bilde kjennetegnes derfor av høy troverdighet og parallakse, det vil si muligheten til å se det fra ulike punkter.

For å vise hvilken type kunstnerisk budskap det dreier seg om, er det best å bruke noen eksempler. Innenfor kunstholografi er den mest kjente personen utvilsomt Margaret Benyon (1940–2016), en britisk pioner når det gjelder bruk av holografisk teknologi i kunst. En kopi av en av hennes mest kjente hologrammer, Tigirl, vises i Fig. 7. I dette kunstobjektet brukte kunstneren metoden med flere eksponeringer for å oppnå effekten av gjennomtrengende romlige bilder. I den endelige presentasjonsversjonen er Tigirl et refleksjonshologram som skal sees i hvitt lys.



Fig. 7. Et multi-eksponeringshologram laget med en pulsert laser: Margaret Benyon, Tigirl.



Fig. 8. Et regnbuehologram sett i hvitt lys.

I motsetning til dette viser riktignok Fig. 8 et bilde rekonstruert fra et regnbuehologram. Teknikken ble introdusert av Stephen Benton på slutten av 1960-tallet. Disse hologrammene kjennetegnes av fravær av vertikal parallakse samtidig som de opprettholder horisontal parallakse. De kan gjenskapes ved hjelp av hvitt, ikke-kohærent lys. Regnbuehologrammer er gjennomsiktige. Det betrakte bildet glitrer med alle fargene i regnbuen på grunn av selektiv diffraksjon som skjer i prosessen med å rekonstruere det synlige bildet. Den består spesielt av fragmenter av stripemønsteret til hologrammet som blir rekonstruert ved hjelp av det smale bølgebåndet i det neste spekterområdet for synlig lys — som om de blir 'valgt' fra hele spekteret av hvitt lys.

Et annet eksempel på hvordan holografi kan brukes er kunstverket laget ved Kunstuniversitetet i Poznań av Jarosław Bogucki og Szymon Zwoliński. De utnytter spesifikke egenskaper ved det holografiske bildet, dvs. romlighet og variasjonen i bildet som blir reproduisert avhengig av punktet det blir sett fra, og kombinerer dem med virkelige romlige former i form av skulpturer. Sameksistensen av romlige objekter og et trofast holografisk bilde gjør det mulig å oppnå en helt unik visuell effekt. Noen eksempler på kunstobjekter vises i Figs. 9–11.

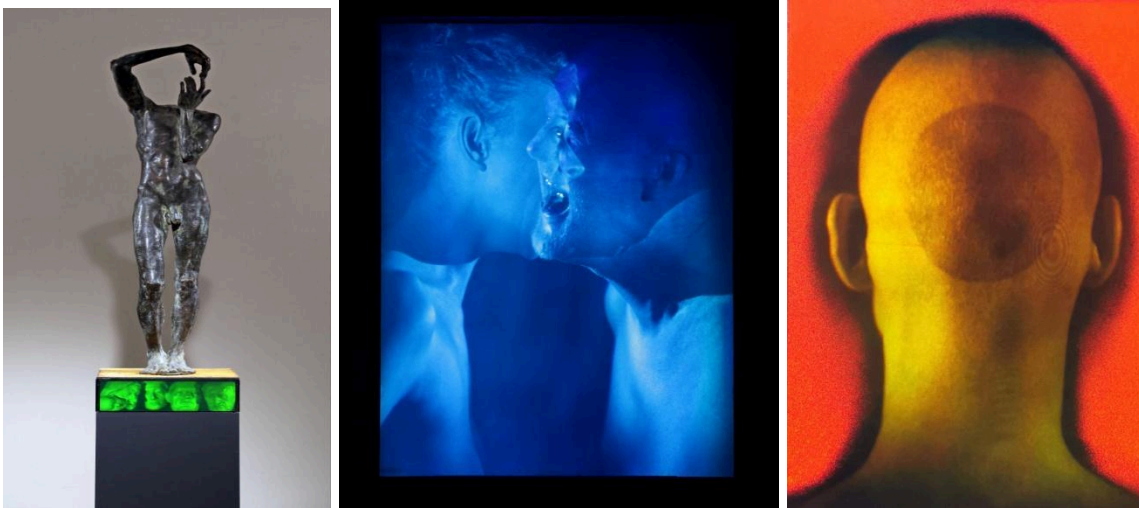


Fig. 9. Jarosław Bogucki, Narcissus, høyde 270 cm, bronse, et hologram, sponplate, stål, 2018.

Fig. 10. Jarosław Bogucki, Word for Word, 40×50 cm, et hologram, 2018.

Fig. 11. Szymon Zwoliński, Untitled (holografiske selvportretter 1, 2), fra serien Burnout, 2019–2020.

Denisyuk-hologrammer kan betraktes som en spesifikk variant av holografisk teknikk. Navnet hedrer Yuri Nikolaevich Denisyuk, en russisk forsker som oppfant denne teknikken for å lage hologrammer. Fordelene med Denisyuk-hologrammer inkluderer bruk av en enkel struktur for å registrere dem og å få et hologram som kan gjenskapes i hvitt lys. I tillegg er slike hologrammer lett gjenkjennelige, da det rekonstruerte bildet ligger helt bak hologramplanet og gir inntrykk av å se på en utstillingsmonter.



Fig. 12. Professor Ventsi Sainov viser en Denisyuk-hologram av et par nittendeårspistoler brukt av den russiske hæren. Hologrammet ble laget av hans institutt i 1982 med noen av de beste russiske emulsjonene, noe som gjør det til et verdifullt samleobjekt.

#### 4. Opprinnelse og utvikling av holografi

De grunnleggende prinsippene for holografisk opptak kan spores tilbake til den polske fysikeren Mieczysław Wolfke, som arbeidet på 1920-tallet. Hans arbeid handlet om bildeopptak uten linser av et molekylært gitter. Når det gjelder den generelle teorien om holografisk opptak, ble den utviklet mot slutten av 1940-tallet og begynnelsen av 1950-tallet av Dennis Gabor, en ungarsk fysiker som arbeidet i Storbritannia. Teknikken beskrevet av Gabor var ment å gjøre det mulig å øke oppløsningen av elektronmikroskopet for å observere individuelle atomer. Imidlertid kunne det også brukes til å kode bildeinformasjon. Gabor gjorde til og med forsøk på å registrere enkle objekter i et aksialt opptakssystem. Han oppnådde imidlertid ikke tilfredsstillende resultater fordi han brukte en kvikklampe med relativt lav koherens. Det var ikke før utviklingen av enheter som utstrålte høykoherente lysstråler, dvs. laserne, som dukket opp mot slutten av 1950-tallet, at interessen for holografi økte. I 1962 laget Emmett N. Leith, en amerikaner, og Juris Upatnieks, en latvier, den første off-aksen holografiske opptak ved hjelp av en kontinuerlig utslippsgasslaser. Dermed begynte den raske utviklingen av holografi.

Det var omtrent fram til midten av 1970-tallet at artikler om ulike holografiske teknikker og deres anvendelser regelmessig ble publisert. Nødvendigheten av komplekse optomekaniske systemer og høye kostnader for drift av holografiske arbeidsstasjoner bidro til en nedgang i intensiteten av forskning mot slutten av 1970-tallet.

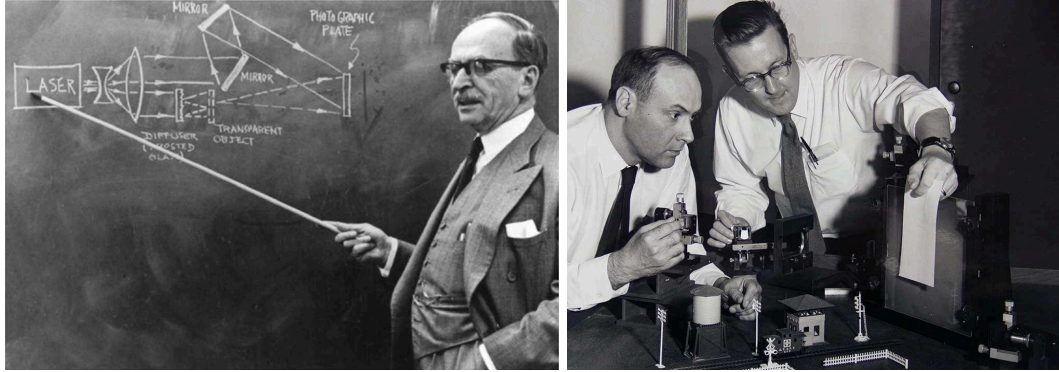
Samtidig bør det nevnes at i 1972 utviklet Leonid Yaroslavsky og Nikolai Merzlyakov den teoretiske basisen for opptak av hologrammer ved diskrete metoder. Spredningen av laser, fremskritt innen opptaksmedier brukt i holografi, og aktiviteten til personer som oppfatter holografi som et utmerket og unikt middel for kunstnerisk uttrykk, har utløst den nåværende renessansen av holografi. Et stort antall vitenskapelige, FoU- og kommersielt orienterte sentre (la oss nevne vanlig brukte sikkerhetshologrammer), samt reklame- og kunstholografistudioer, jobber kontinuerlig med å sikre utvikling og forbedring av metoder for å registrere fullstendig, tredimensjonal bildeinformasjon om objektet og scenen.

En ekstremt viktig milepæl i utviklingen av holografi var utviklingen av digital holografisk utskrift, som ble oppnådd av Stanislovas Zacharovas (lederen for det litauiske Geola-laboratoriet). Denne prosessen bruker et holografisk kamera som samler inn inndata i inkohærent lys, og en holografisk skriver som basert på dataene "printer" en diffraksjonsgitter på et kontinuerlig medium på en optisk måte. Det tredimensjonale bildet gjengis deretter i hvitt lys med full horisontal parallakse bevart.



Fig. 13. Mieczysław Wolfke.





Figs. 14–15. Dennis Gabor (left); Emmett Leith and Juris Upatnieks (right).

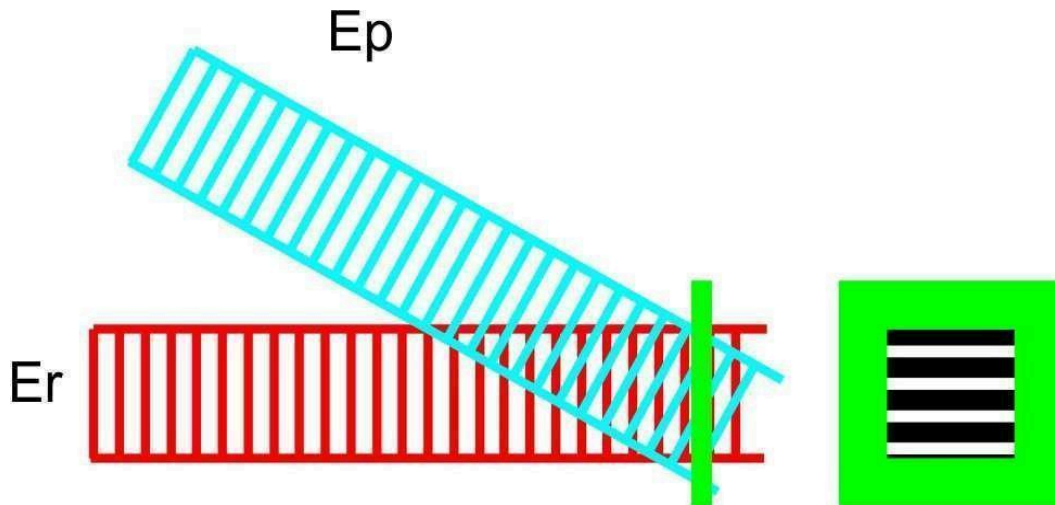


Fig. 16. The Geola holographic printer.

### 5. Prinsippet for holografisk opptak

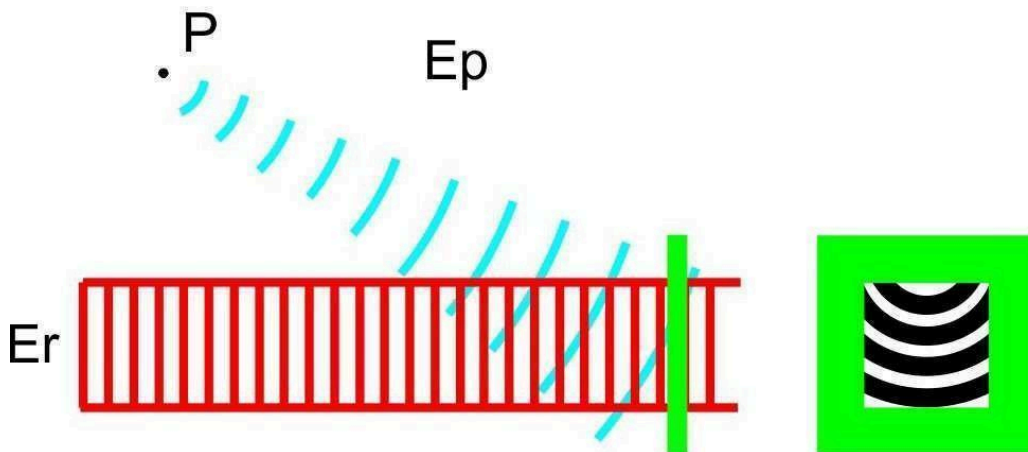
I ethvert system som brukes til å registrere holografiske bilder, er det to interfererende bølger. I det enkleste tilfellet er disse to planbølger. Hvis de rettes mot hverandre med en bestemt vinkel til et opptaksmedium, oppnås et rutenett med rette striper. Figur 17 viser posisjonen til opptakeren og den skjematiske mønsteret til det registrerte mikrointerferogrammet. La oss introdusere begrepet en referansebølge i holografiprosessen (Er-bølge) her. Objektbølge (Ep) er derimot strålen som bærer informasjon om scenen eller objektet som blir registrert.





Figur 17. Interferens av to planbølger genererer et rutenett av rette striper;  $E_r$  — referansebølgen,  $E_p$  — objektbølgen.

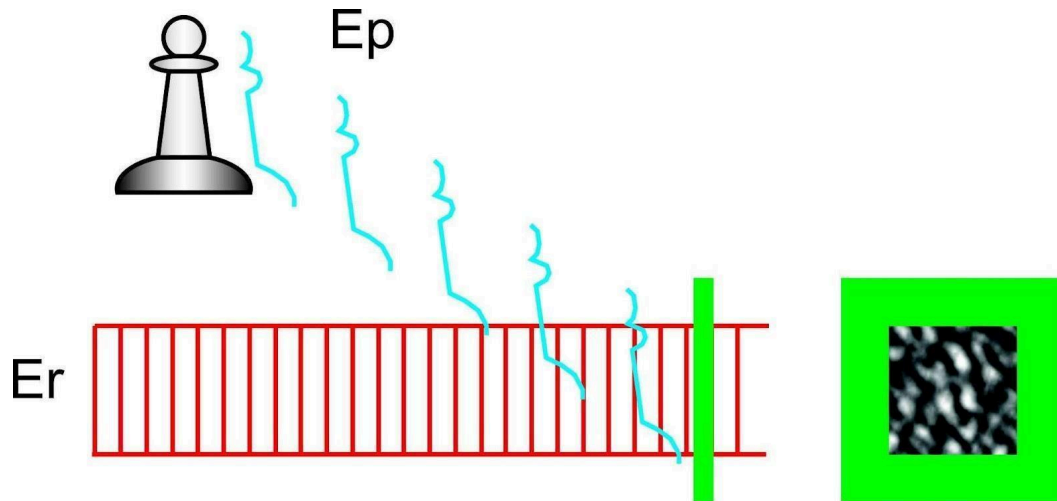
Hvis en bølge i en av grenene som treffer mediet blir endret (for eksempel hvis en sfærisk bølge hvis kilde er et lyspunkt blir brukt), vil det bli dannet en mosiakk av sirkulære interferensstriper i planen for bildeopptaket (Fig. 18). I det spesielle tilfellet der begge bølgene har samme retning, vil sentrum av sirklene definert av stripene være selve sentrum av det registrerte hologrammet.



Figur 18. Interferens av den plane referansebølgen  $E_p$  og den sfæriske objektbølgen  $E_p$  genererer et rutenett av konsentriske striper.

La oss nå anvende en mer komplisert modifikasjon. La oss anta at en av bølgene er en bølgefront som nøyaktig samsvarer med et objekt. Dette kan for eksempel være en bølge som reflekteres fra objektet vi ønsker å holografere. På opptakspunktet vil det være en interferens av de to bølgene, referansebølgen  $E_r$  og objektbølgen  $E_p$ , noe som resulterer i en uregelmessig, tilsynelatende uordnet floke av striper med ulike posisjoner og kontraster (Fig. 19). All informasjon om objektet er kodet her i kontrasten og plasseringen av stripene. Dette er objektets lysstyrke, eller amplitudinformatjon, som

forteller oss om fordelingen av gråtoner på overflaten, og faseinformasjon, som er ansvarlig for objektets romlige egenskaper.



Figur 19. Interferens av referansebølgen  $E_r$  med en flat bølgefront og objektbølgen  $E_p$  som stammer fra et komplekst objekt produserer et komplekst rutenett av striper, som kan forstås som kodede informasjon om egenskapene til objektbølgen og dermed kodede informasjon om scenen eller objektet.

## 6. Prinsippet for holografisk rekonstruksjon

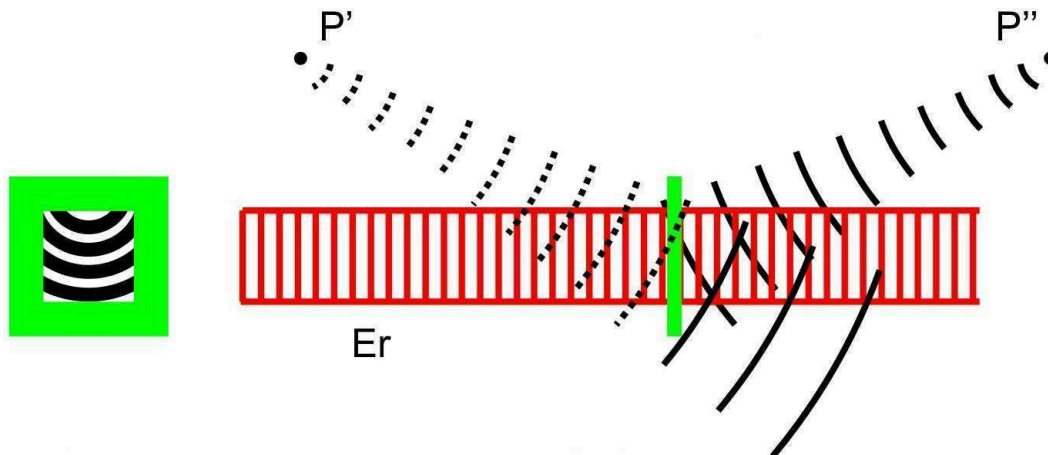
I holografi blir striasjonsmønsteret (mikrointerferogram) som oppnås som et resultat av interferensen mellom referansebølgen og objektbølgen, registrert på et opptaksmedium, for eksempel holografisk film, som mest hyppig inneholder et lag av sølvsalter. Når vi ser på hologrammet som er skapt på denne måten med det blotte øye, er vi ikke i stand til å lese noen informasjon. Alt vi ser er uordnede, meningsløse små prikker, vekselvis mørke og lyse (når det sees med høy forstørrelse).

Adekvat belysning av hologrammet er en forutsetning for dannelsen av et holografisk bilde. Bare hvis denne betingelsen er oppfylt, vil det være mulig å rekonstruere bildet som et resultat av diffraksjonen av lyset som lyser opp hologrammet på den registrerte stripedede mikrostrukturen, og gjengi objektbølgen med svært høy troverdighet. Det kan sies at bølgen rekonstruert fra hologrammet vil være som et fragment av bølgen som kommer fra den virkelige scenen eller objektet.

I samsvar med hvordan diffraksjon virker, vil en del av energien fra en bølge som treffer et diffraktive element (dvs. et hologram i det diskuterte tilfellet) bli propagert i henhold til dens opprinnelige retning. Her kalles denne bølgen for nullte diffraksjonsorden. En del vil imidlertid bli avbøyd som pålagt av mikrointerferogramstrukturen. Dette vil være den første og eventuelt påfølgende diffraksjonsorden. Innenfor holografisk teknikk er vi bare interessert i den første rekken.

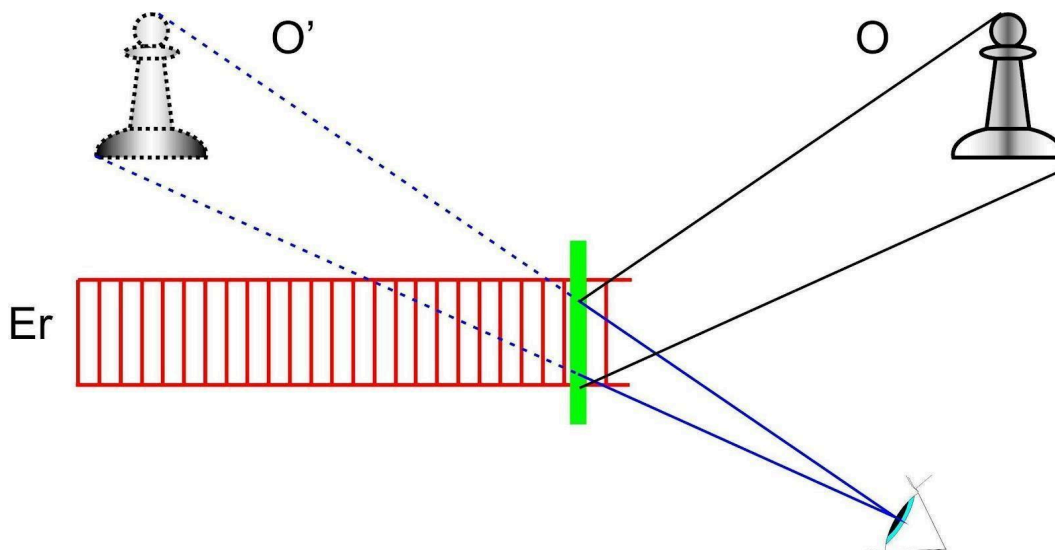
La oss anta at vi bruker hologrammet som er registrert i systemet vist i Fig. 18, der en lyskilde var objektet. Ved å belyse mikrointerferogramstrukturen registrert på hologrammet med en bølgeform identisk med referansebølgen som ble brukt under opptaket, vil vi få to bilder av lyskilden - et tilsynelatende og et virkelig (jfr. Fig. 20). I det klassiske tilfellet vil rekonstruksjonen resultere i to bilder, nemlig  $P'$  - det enkle,

tilsynelatende, som er en nesten perfekt kopi av objektet, og  $P''$  - det sammenkoblede, virkelige.  $P'$ -bildet kan betraktes som en inversjon av det opprinnelige, et bilde motsatt det opprinnelige. (Siden det er mindre interessant for oss fra et avbildningsperspektiv, og dessuten sjelden brukes i avbildning, la det være tilstrekkelig her at et slikt bilde fysisk eksisterer).



Figur 20. Rekonstruksjonen av hologrammet som er registrert i oppsettet vist i Fig. 18. En person som ser på rekonstruksjonen av dette hologrammet (dvs. det tilsynelatende bildet  $P'$ ) vil få inntrykk av at de ser på den faktiske kilden til punktlýset som ble brukt under opptaket (dvs.  $P$  i Fig. 18). Ja, det vi mener er nettopp det, at for betrakteren vil  $P'$  være identisk med  $P$ .

Når vi nå erstatter hologrammet vårt med ett som inneholder informasjon om et objekt (for eksempel oppnådd som et resultat av opptaket ved hjelp av systemet vist i Fig. 19), og belyser det med en rekonstruksjonsbølge som er i samsvar med referansebølgen  $E_r$ , vil diffraksjon føre til at rekonstruksjonsbølgen bøyer seg slik at de første diffraksjonsrekke vil lage to bilder av objektet, dvs. et tilsynelatende og et virkelig (se Fig. 21). Det tilsynelatende bildet vil være stereoskopisk, dvs. det vil nøyaktig matche egenskapene til objektet og vil være på samme 'sted' som objektet. Det kan sees med det blotte øye, eller fotograferes med en kamera på samme måte som et objekt kan fotograferes. Det vil også ha full horisontal og vertikal parallakse, slik at betrakteren vil kunne 'se' bak objektet fra begge sider, samt ovenfra. Parallakse kan sies å være begrenset av 'vinduet' til hologrammet.



Figur 21. Et hologram registrert ved hjelp av systemet vist i Fig. 19, belyst med en rekonstruksjonsstråle identisk med referansestrålen Er som ble brukt under opptaket, vil gjøre det mulig å gjenskape en tro kopi av bølgeformen som representerer det virkelige objektet. Dette vil – mest betydningsfullt i dette tilfellet – gi observatøren inntrykk av å se på det virkelige objektet. Holografi er derfor den mest trofaste registreringen av bildeinformasjon om en scene eller et objekt.

## 7. Krav

Det er flere betingelser som må oppfylles for at en hologram skal bli riktig registrert. For det første krever fenomenet interferens i tråd med fysikkens grunnleggende prinsipper bruk av koherente bølger. Koherens betyr evnen til å opprettholde en konstant faseforskjell under propagasjon. I tillegg må bølgene ha samme polarisasjonsazimut, være monokromatiske og stabile over tid. En laser er en lyskilde som oppfyller de nevnte kravene. Imidlertid er ikke enhver laser egnet for bruk i holografi, da noen lasere ikke har tilstrekkelige parametere for å oppnå et homogent interferansefelt under opptaksprosessen av et hologram.

Videre må stabiliteten til opptakssystemet opprettholdes under opptaket. Dette ligner på fotografering, der vi vil få et mangelfullt bilde hvis vi ikke holder opptakssystemet, scenen eller objektet stabilt under eksponeringen. I holografi vil manglende opprettholdelse av stabiliteten til interferansefeltet forårsake en lignende effekt. Striationene vil være av dårligere kvalitet eller gå tapt helt. Imidlertid er kravene mye strengere her, da strationene i mikrointerferogrammet har små dimensjoner (av størrelsesorden  $\mu\text{m}$ – $\text{nm}$ ). Avslutningsvis må vi understreke at det må tas forsiktighet for å sikre at opptakssystemet er eksepsjonelt stivt og så isolert som mulig fra eventuelle eksterne påvirkninger, som vibrasjoner og temperaturendringer.

I moderne praksis er det ikke vanskelig å oppfylle de nevnte kravene. Det er veldig enkelt å sikre stivhet ved nøye design og konstruksjon av arbeidsstasjonen. Andre krav kan håndteres ved for eksempel å begrense eksponeringstiden til opptakeren så mye som mulig. I så måte må noen enkle forhold tas i betraktning. Jo mer fotosensitivt materialet

og jo mer intens laserstrålen er, desto kortere tid kreves for opptaket. I praksis viser det seg at når strenge tidsbegrensninger overholdes, kan holografi brukes selv med relativt enkle og rimelige lasere (for eksempel laserdioder) og ved en viss ustabilitet i systemet selv (selv ustabile objekter kan bli registrert).

## 8. Hvitt lys

Hittil har vi hovedsakelig diskutert tilfeller der en laser er nødvendig for både opptaks- og rekonstruksjonsprosessene, altså en lyskilde som ikke finnes i enhver skuff. Åpenbart var dette i fortiden en betydelig hindring for populariseringen av holografi og holografiske bilder, så metoder har blitt utviklet for å forberede hologrammer som kan sees ved hjelp av ikke-koherent og bredspektrert (ikke-monokromatisk, inkludert hvitt) lys. Moderne teknologi gjør til og med det mulig å samle inn inngangsdata for opptaksprosessen uten at koherenskravet oppfylles, men vi vil hoppe over dette emnet i denne artikkelen. Vi oppfordrer deg til å utføre forskning og utvide kunnskapen din på dette området!

Hvis vi ser på diagrammene som viser holografisk opptaksprosess (Figs. 17, 18, 19), kan vi se at interferansesstriationene er ordnet i et mønster som endres i opptakets plan (emulsjon). Hvis vi tar materialet med det slik registrerte hologrammet og ser på det med høy forstørrelse, vil vi se (i det generelle tilfellet) striasjoner ordnet langs kantene av dette materialet (hologrammet) — se Fig. 22. Rekonstruksjonen av et slikt hologram vises i Figs. 20 og 21. Hvis vi i denne prosessen erstatter laserlyset med hvitt lys, vil rekonstruksjonen bli forstyrret, og det vil ikke bli oppnådd noe bilde. Tilskueren vil sikkert ikke like dette.

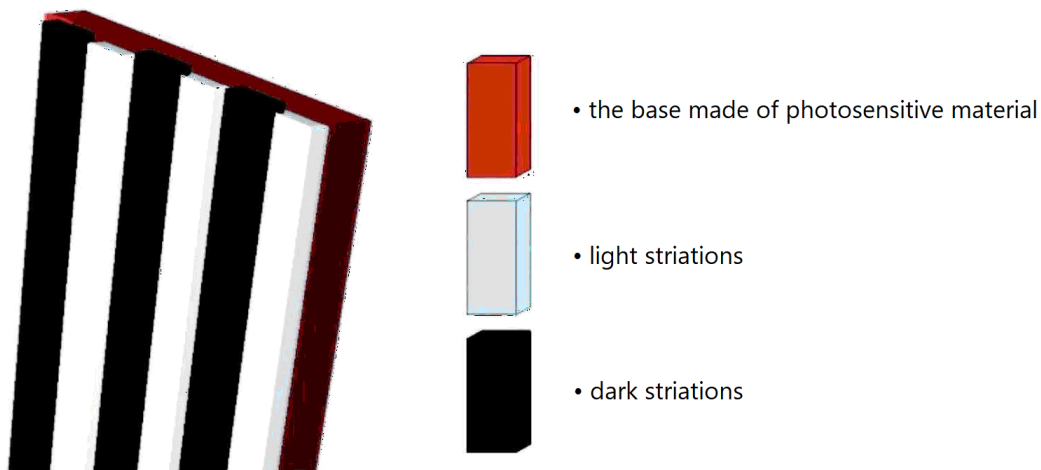


Fig. 22. Striationene til det såkalte tradisjonelle hologrammet er ordnet i et mønster som endres i materialets plan. Mønsteret er variabelt og avhenger av dimensjonene til hologrammet. Diagrammet viser rektile striasjoner for enkelhet (slike striasjoner er et resultat av interferens av to flat-front bølger), men i holografi er striasjonsstrukturen langt mer komplisert.

Vi vil imidlertid kunne se på et hologram i hvitt lys og få en full gjengivelse av det holografiske bildet (dvs. med både rom og parallakse bevart) hvis vi bruker en metode



som tillater oss å utnytte selektiviteten til diffraksjonsvolumgitteret (Braggs diffraksjon). En modell av et slikt gitter vises i Fig. 23. Vi kan forestille oss et volumetrisk gitter (i vårt tilfelle et volumetrisk eller tykt hologram) som striper hvor mønsteret endres med tykkelsen av informasjonsbæreren (emulsjon). Hvis vi lyser opp et slikt hologram med hvitt lys, vil diffraksjon bare skje for en bestemt bølgelengde. Takk være det, trenger ikke lyset som sendes ut av reproduksjonskilden å være monokromatisk. Imidlertid må det sikres at reproduksjonen gjøres ved hjelp av kilder med så liten størrelse som mulig, helst punktkilder. Når denne betingelsen ikke er oppfylt, blir det produsert mange bilder, av forskjellige posisjoner, slik at det holografiske bildet er uklart, uskarpt. Hvorfor skjer dette? En ikke-punktkilde (kontinuerlig) kan forestilles som et sett med punktkilder. Hver slik kilde, som er en komponentpunkt av vår kontinuerlige kilde, vil føre til at et bilde blir produsert på en litt annen posisjon. Dermed vil sammensetningen av disse reproduksjonene produsere et multiplisert, uskarpt, uklart bilde. Når et slikt volumetrisk gitter er laget for å inneholde tre lag, hvorav hver er et diffraktivt volumetrisk gitter tilpasset hver av de tre bølgelengdene, som tilsvarer de tre grunnleggende komponentene (RGB), får vi gjengivelse av et fargebilde ved hjelp av bare en lyskilde, dvs. en kilde til punkthvitt lys. Da vil vi produsere et fargehologram som skal sees i hvitt, reflektert lys.

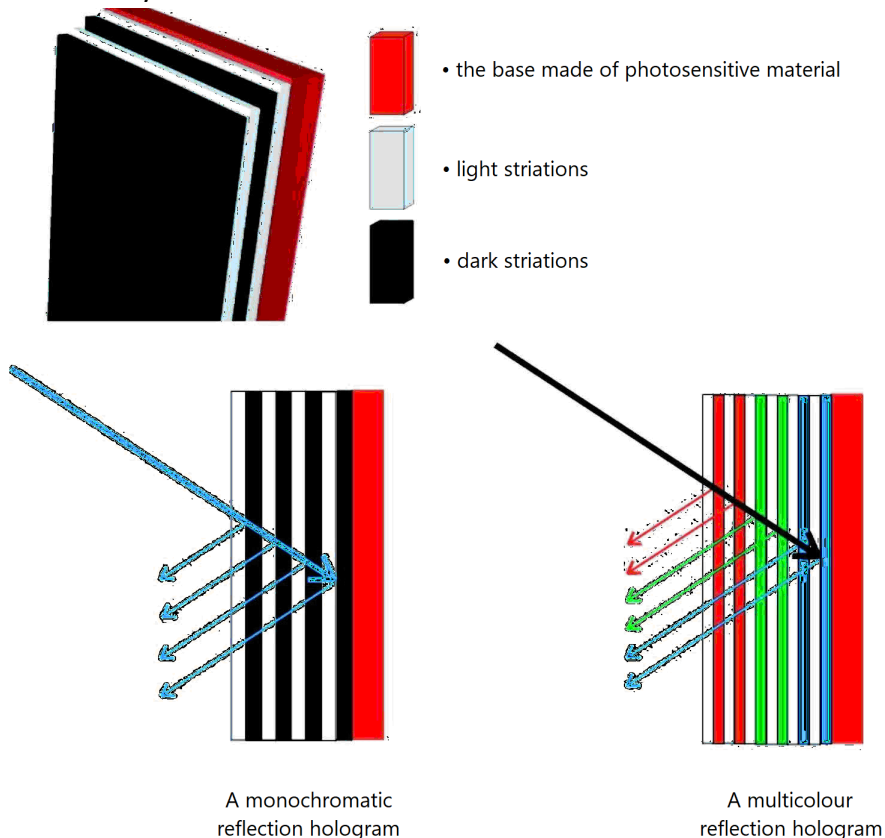


Fig. 23. Strukturen til et volumetrisk gitter (et volumetrisk eller tykt hologram) består av striper arrangert i et mønster som endres med tykkelsen på mediet. For slike gitter oppstår diffraksjon ved en veldefinert bølgelengde. Hvis et volumetrisk hologram består av tre lag, det vil si tre volumetriske gitter, oppnås en

reproduksjon av et fargebilde.

### 9. Refleksjon og Denisyuk hologrammer

La oss nå fokusere på metodene for opptak av refleksjonshologrammer, dvs. hologrammer med volumetriske striasjoner. Et hologram kalt planar, dvs. med striasjoner arrangert i et mønster som endrer seg i planet til hologrammet, oppnås i systemer der objektstrålen  $E_p$  og referansestrålen  $E_r$  faller på opptaksmediet fra samme retning. Volumetriske hologrammer, såkalte tykke hologrammer, der striasjonene er arrangert i et mønster som endrer seg med tykkelsen til bæreren, krever en konfigurasjon der objektstrålen og referansestrålen når opptaksmediet fra motsatte sider.

Det er verdt å merke seg at posisjonen til den holografiske bildet vil være i samsvar med den virkelige gjenstanden (selvfølgelig, relativt til referansepunktet på selve hologrammet), dvs. den vil være plassert på samme avstand, den vil forbli den samme størrelsen, osv. Hvis objektet under opptaket er langt fra planet til opptaksmediet, vil det rekonstruerte bildet også virke å ligge langt bak planet til hologrammet. Selvfølgelig er det mulig å lage et volumetrisk hologram slik at det rekonstruerte holografiske bildet er i hvilken som helst posisjon i forhold til hologramplanet - det kan til og med være delvis foran og delvis bak hologramplanet - men dette krever kopiering, er relativt komplisert og innebærer bruk av komplekst utstyr. Du kan se denne prosessen i en klasse ved pulsholografilaboratoriet ved Universitetet i Kunsten Poznan.

På slutten av 1950-tallet og begynnelsen av 1960-tallet utviklet den russiske forskeren Yuri Denisyuk en metode for opptak av en volumetrisk diffraksjonsgrating ved hjelp av en enkelt lysstråle. I denne metoden opprettes holografiske opptakssystemer der objektet som skal holograferes, plasseres direkte bak planet til opptaksmediet (f.eks. holografisk film), og referansestrålen  $E_r$  rettes mot den fra den andre siden. Hologrammene som er oppnådd på denne måten, kalles Denisyuk-hologrammer.

I praksis er Denisyuk-systemet som brukes til opptak av hologrammer, det enkleste av alle metodene som brukes innen holografiteknologi. For å bygge det trenger man en kilde til kohærent lys (laser), en romlig filter (den såkalte nåløyet), en holder for opptaksmediet og et bord plassert bak denne holderen som tillater at hologramobjektet plasseres veldig nær planet til opptaksmediet. Lysstrålen som har passert gjennom opptaksmaterialet, vil deretter bli reflektert av objektet bak det og vil bli, i det holografiske systemet, objektstrålen  $E_p$ . Denne strålen vil interferere med den direkte fallende strålen som har funksjonen til referansestrålen  $E_r$ . Et eksempel på en slik ordning vises i Figur 24.

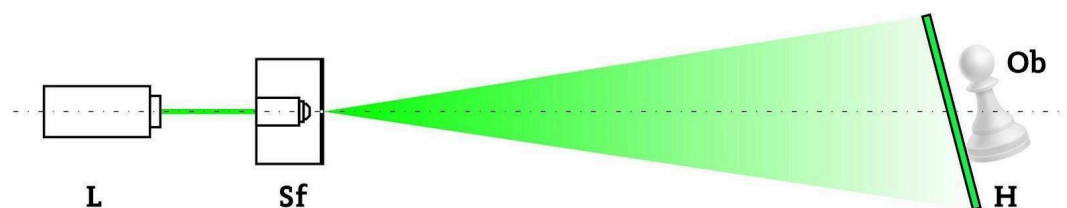


Fig. 24. Det grunnleggende systemet for opptak av Denisyuk-hologrammer. En stråle med kohærent lys fra laser L kommer til romfilteret Sf (bestående av et mikroskopobjektiv og en nøyaktig laget pinhole med

liten diameter). I henhold til prinsippene for bølgefysikk er filteret en meget god tilnærming til en punktkilde, bak hvilken bølgefronten blir sfærisk. Strålen lyser opp et system som består av opptaks materialet H og objektet Ob. Helningen til H og Ob anbefales fordi i rekonstruksjonsprosessen bør retningen til rekonstruksjonsstrålen være den samme som retningen til spredning av referansestrålen.

### 10. Varianter av Denisyuk-hologramopptakssystemet

Figur 24 viser oppsettet med romfilteret Sf. Dessverre er dette elementet relativt dyrt og ganske komplisert å bruke (det må rettfærdiggjøres). Imidlertid er det mulig å forenkle oppsettet og bare bruke et mikroskopobjektiv i stedet for Sf-filteret. Ulempen med en slik løsning er en uhomogen stråle, som senere kan forårsake for eksempel flekker på objektet, ujevn belysning av deler av objektet eller noen ganger uønskede interferensmønstre. Noen ganger kan det imidlertid være verdt å velge dette, da arbeidet ditt forenkles.

En ytterligere modifikasjon av opptakssystemet vist i Figur 24 er å legge til en kollimator (se Figur 25). Dette er en linse som brukes til å konvertere en sfærisk-frontstråle til en flat-frontstråle. Dette vil resultere i en mer ensartet belysning av objektet. Kollimatoren må være stor nok i diameter til å tillate at strålen faller over hele overflaten til opptaks materialet. Ved rekonstruksjon anbefales det å sørge for at rekonstruksjonslyskilden gjengir opptakssystemet så nært som mulig. I praksis er sollyst det beste for å rekonstruere Denisyuk-hologrammer som er blitt registrert på denne måten.

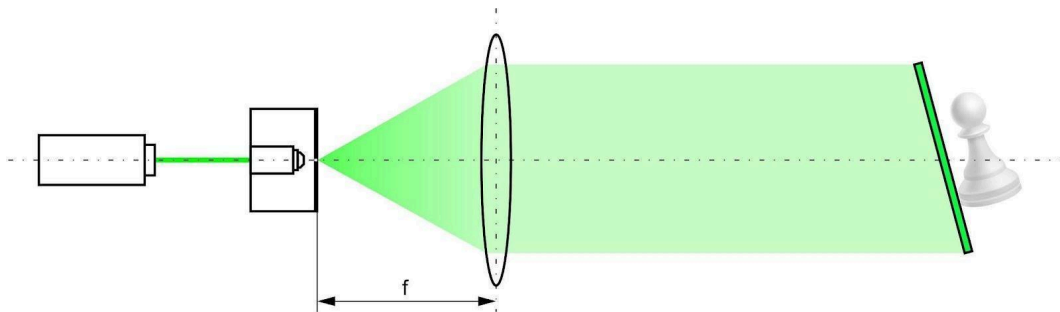


Fig. 25. Denisyuk-hologramopptakssystem med en kollimator. For å oppnå en flat-frontstråle, må punktkilden (dvs. nåløyet) være nøyaktig ved fokus for linsen. Dette kontrolleres for eksempel ved å måle diameteren på strålen på en liten avstand bak kollimatoren og på mye større avstand - diameterene bør være identiske.

Vi har skrevet ovenfor at opptaks materialet H og objektet Ob må plasseres i en vinkel til den optiske aksene. Men hva kan gjøres hvis vi ikke kan oppfylle dette kravet, for eksempel på grunn av mekaniske begrensninger eller på grunn av objektets natur? Det er mulig å gjøre opptak ved hjelp av en stråle som er vinkelrett på opptaks materialet (se Fig. 26). Også her må det huskes at lyskilden og referansestrålen må være justert på samme måte med hensyn til hologrammet. Rekonstruksjonslyset bør derfor falle loddrett på hologrammet.

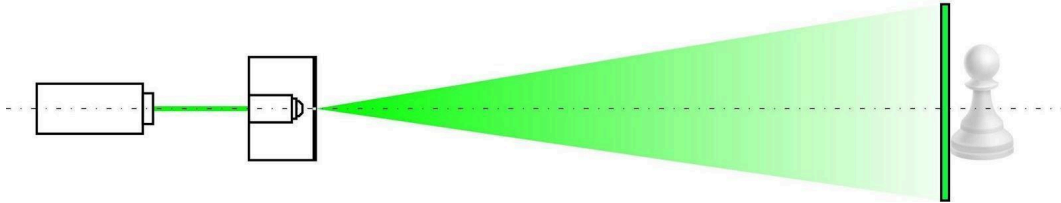


Fig. 26. Et Denisyuk-hologramopptakssett med en lysstråle som er vinkelrett på opptaks materialet.

## 11. Opptaks materialer

Når hologrammer blir opptatt, brukes holografiske materialer basert på sølvhalider (dvs. lignende fotografiske emulsjoner, men med mye høyere oppløsning og lavere fotosensitivitet); materialene er hovedsakelig tilgjengelige i form av film eller membraner.

Når du bruker film, er det best å klippe den riktig før arbeidet slik at den kan plasseres komfortabelt i holderen. For å gjøre dette, fest filmen på et glassark med lav tykkelse. Både filmen (limt til glass) og filmen bør brukes slik at emulsjonen vender mot objektet. Sølvbaserte materialer krever fotokjemisk behandling i spesielle løsninger. Den første prosessen er holografisk fremkalling, etterfulgt av skylning og deretter bleking. Utvikleren skal avsløre den latente bildet som er oppnådd ved eksponering. Reduksjonsprosessen av fotosensitive sølvhalider til metallisk sølv skjer på dette stadiet. Siden i et holografisk system med volumetriske striasjoner som dannes, varierer de med tykkelsen til emulsjonen, bør materialet være sterkt svartet etter en riktig utviklingsprosess. Et slikt hologram er ikke egnet for rekonstruksjon, da det ville absorbere all strålingen fra rekonstruksjonsstrålen. For å muliggjøre effektiv rekonstruksjon, brukes en blekeprosess under hologrambehandlingen. Blekingen er ment å fjerne metallisk sølv fra de utviklede områdene og forårsake at det i stedet for et intensitetsrutenett (hvor hologramstriasjoner varierer i lysstyrke), dannes et faserutenett (hvor striasjonene varierer med hensyn til deres lysbrytningsindekser). I tilfelle tykke hologrammer er bleking nødvendig, da mørke striasjoner i et intensitetsrutenett ville absorbere nesten all strålingskraft fra rekonstruksjonsstrålen, noe som gjør rekonstruksjonen umulig (eller resulterer i svært dårlig effektivitet og dårlig synlighet av bildet). Behandlingen bør avsluttes med grundig skylning og tørking av materialet.

Den andre typen opptaks materialer som ofte brukes i holografi er fotopolymere. Den viktigste forskjellen er at de ikke krever fotokjemisk behandling og garanterer svært høy diffraksjonseffektivitet (det rekonstruerte bildet kjennetegnes av svært høy lysstyrke og klarhet). Når hologrammet er opptatt, er det tilstrekkelig å fikse slikt materiale ved eksponering for UV-bølger. Forberedelsen av materialet er imidlertid en litt mer krevende prosess. En fotopolymerskive er ganske tynn og slapsete, så den må påføres nøye på et glasssubstrat før opptaksprosessen. Dessverre er disse materialene veldig følsomme for forurensning. Selv en liten flekk med pollen eller lett forurensning av substratet vil resultere i manglende evne til å registrere interferensgitteret på dette punktet, og dermed en svart flekk ('hull') i det rekonstruerte bildet. Glasset må være flatt, feilfritt, uten luftbobler, bulker eller tykkere deler. Det må være rent, grundig vasket og tørket. Det må også tas hensyn til at limingen skjer i ren luft, fri for støv og partikler. Materialet som er forberedt på denne måten plasseres i opptakssettet, som

halogen-sølvmaterialer, med den lysfølsomme laget, eller fotopolymeren, mot objektet.

## **12. Eksponering**

Eksponering er en parameter som i stor grad påvirker kvaliteten på det endelige hologrammet. Jo bedre kontrasten til de holografiske striasjonene, desto høyere diffraksjonseffektivitet og dermed bedre gjengivelse av bildet. Laserkraften og strålestørrelsen bestemmer eksponeringsverdien. Jo høyere kraft og jo mindre strålestørrelse, desto høyere er eksponeringen. Tid er den andre parameteren som bestemmer eksponering. Jo lengre det er, desto høyere er eksponeringen. Når du justerer disse parameterne, må du velge eksponeringen som er passende for det brukte materialet - til dets type og dimensjoner.

I praksis har vi en konstant laserkraft for et gitt system. Det vi vanligvis kan endre, er imidlertid størrelsen på strålen i planet av opptaksmaterialet. Denne størrelsen vil bli justert slik at den lyser opp holografimaterialet av antatte dimensjoner så jevnt som mulig. Når opptakssettet er satt opp i henhold til dette, kan vi begynne å justere eksponeringslengden.

Ideelt sett bør tettheten til lysstrålen som faller på opptaksmaterialets plan måles. Imidlertid, hvis du ikke har et egnet måleinstrument, kan eksponeringskalkulatorer, som verktøyet tilgjengelig på <https://www.geola.com/online-exposure-calculator/>, være nyttige. Det skal huskes at den beregnede tiden er en tilnærmet verdi, som ikke nødvendigvis er den beste i dine spesielle forhold. Det er derfor tilrådelig å gjøre egne eksponeringstester, bare endre eksponeringstiden, mens du lar de andre parametrene og oppsettet og objektet være uendret. Den optimale eksponeringstiden vil være den tiden der den høyeste diffraksjonseffektiviteten oppnås, dvs. det klareste og mest lyssterke holografiske bildet.

I praksis bør du sikte på så kort eksponeringstid som mulig. Dette skyldes at jo kortere vi eksponerer det holografiske materialet, desto lavere er risikoen for at instabiliteter ødelegger hologrammet vårt.

## **BRUK AV ANALOGE HOLOGRAMMER I KUNSTOBJEKTER SOM EKSEMPLIFISERT I KUNSTVERK LAGET VED HOLOGRAFILABORATORIET VED MAGDALENA ABAKANOWICZ UNIVERSITETET FOR KUNST I POZNAN**

Spatial Imaging Studio er utstyrt med Geolas pulserte holografi-studio HS-5, et system som gjør det mulig å lage analoge hologrammer for kunstneriske formål, med en maksimal størrelse på 100 x 100 centimeter. Kunstverkene som er utarbeidet av studentene i studioet under utdanningsprosessen, er laget i samsvar med studioets læreplan, som ser for seg bruk av hologrammer som et sentralt middel for kunstnerisk uttrykk. Studentene arbeider med fastsatte oppgaver som samsvarer med nivået av kunnskap som er oppnådd i løpet av kurset, og ferdighetene til de enkelte deltakerne. Arbeidet med en oppgave ved hjelp av et hologram som et element i en sammenhengende enhet er en flertrinns prosess der følgende faser kan skilles ut:

- forberedelse av et objekt eller romlig arrangement som skal registreres holografisk;



- prosessen med opptak og nødvendig tilpasning av lysparametere;
- den endelige eksponeringen som må oppfylle spesifikke krav til belysning av hologrammet.

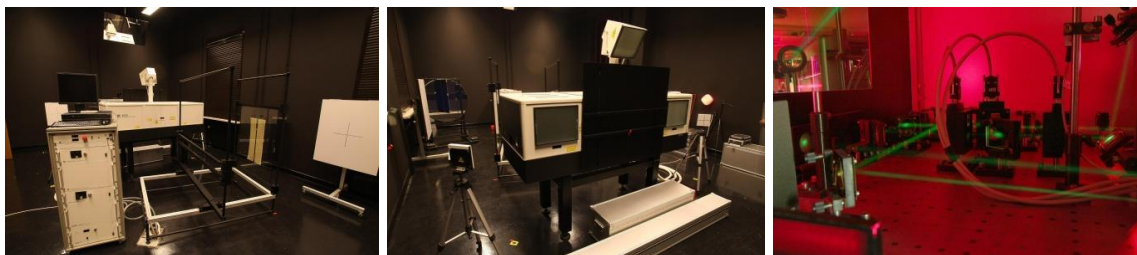
Den didaktiske prosessen i studioet er nært knyttet til de ovennevnte stadiene, som bestemmer retningen for studentenes kunstneriske arbeid. Valget av et objekt eller en situasjon som skal holograferes, er av avgjørende betydning. På grunn av at holografi er en manipulasjon av et virkelig bilde, kan et romlig objekt eller et fragment av en romlig situasjon komme til live i en ny form. Objektet er berøvet kroppslighet og redusert til et illusorisk bilde som kan formes på ulike måter, noe som påvirker dets endelige utseende. Forberedelsen av objektet er ofte en langvarig prosess som involverer bruk av forskjellige skulptur- og verkstedsteknikker. En viktig ferdighet i skapelsesprosessen er evnen til å se på objektet og dens senere plassering med et hologram i tankene, hvor dette monokrome bildet av en romlig situasjon er målformen.

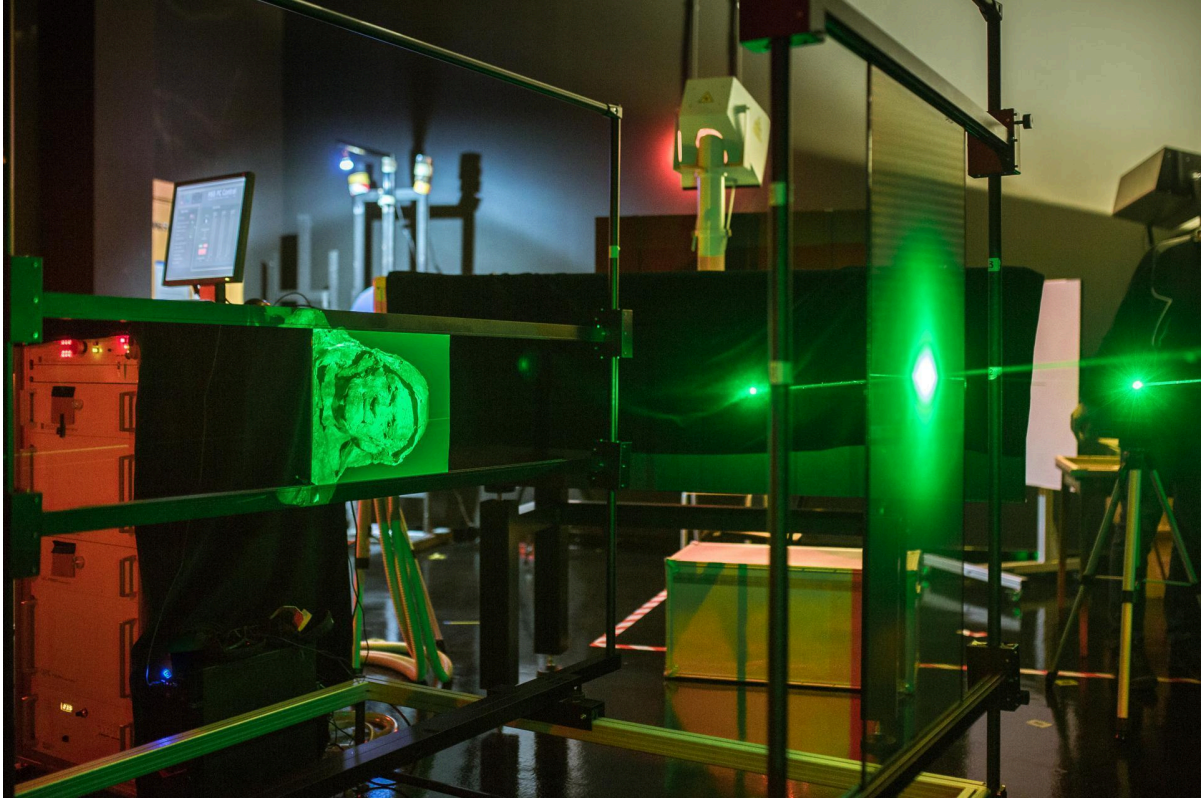
Det legges stor vekt på ferdigheten til bevisst bruk av objektstrålen i skaperprosessen, da det bestemmer det endelige resultatet, og på en kreativ tilnærming til eksponeringsprosessen, for eksempel ved forsøk på flere eksponeringer eller forberedelse av animerte hologrammer etter opptak. Beslutninger om valg av endelig farge på et hologram som brukes i et kunstverk, er også av stor betydning.

Ved planlegging av den endelige presentasjonen må man ta hensyn til krevende eksponeringsforhold, nemlig nødvendigheten av å bruke en separat kilde til rekonstruksjonslys for hvert hologram. Dette kravet kan begrense mulighetene betydelig, men det kan også vise seg å være en tilleggsverdi med en gunstig bidrag til et kunstverk.

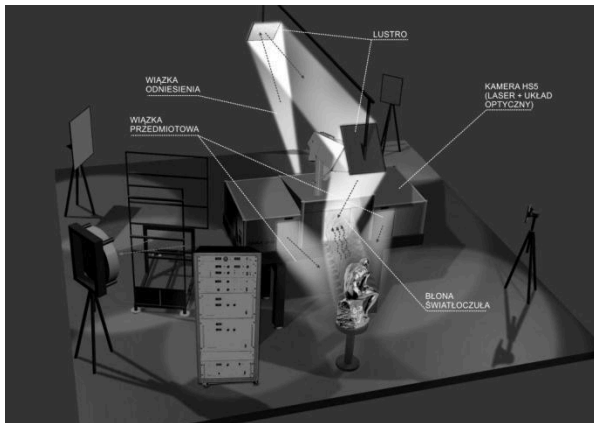
Den lange historien til studioet har resultert i utallige studentrealiseringer og kunstverk der hologrammer spiller sentrale roller. Disse kunstneriske realiseringene er resultater av søken etter nye, ikke-klišerte konsepter ved bruk av hologrammer på kreative måter som et middel til uttrykk som er interessant og adekvat for kunstprosjekter.

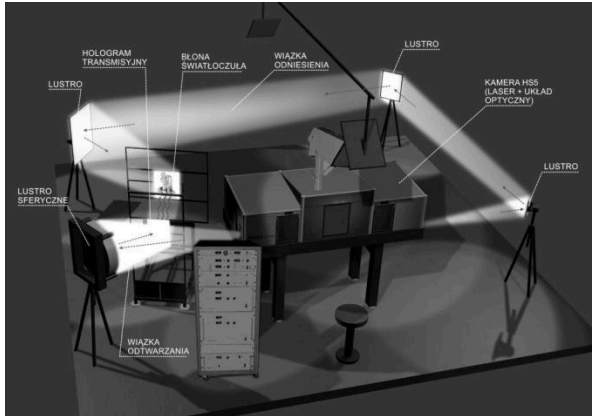
Studentenes kreative aktivitet bidrar til å popularisere holografi, et sjeldent kunstfelt. Deres kunstneriske realiseringer er interessante eksempler på kreative og utviklingsfremmende metoder for bruk av denne teknologien.





Figg. 27–30. Holografisk laboratorium ved Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan.





Figg. 31–32. Diagram som viser eksponering av transmisjonshologram og hvitt lys-hologram i Holographic Laboratory ved Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan.

### Holografisk kunst

Med sjeldne unntak er holografiske bilder knyttet til en form for 3D-fotografi brukt for å registrere objekter eller situasjoner. I prosessen med slik holografisk opptak begrenses den kreative handlingen til å ta noen nødvendige beslutninger angående blant annet valg av objektet som skal holograferes, sammensetningen og/eller parameterne for objektstrålen som er ansvarlig for måten å belyse den registrerte situasjonen. Videre handlinger knyttet til den tekniske prosessen med å registrere et hologram har som regel ingen direkte innvirkning på presentasjonen, med mulig unntak av endring av den endelige fargen på det rekonstruerte hologrammet. Valget av den endelige eksponeringen er den siste beslutningen som skal tas, og løsningen som velges mest hyppig er å henge opp et innrammet hologram på en vegg og belyse det med hvitt rekonstruksjonslys.

Når jeg skriver om holografisk kunst, mener jeg imidlertid et konsept som er mye bredere enn det ovennevnte eksemplet, og som overskrider det med en rekke forventninger, både fra betrakteren og kunstneren.

Allerede i de første årene av holografihistorien oppsto det en diskusjon om det faktisk var en vitenskap eller en kunst. I begynnelsen betraktet en stor del av kunstnerkretser ikke holografi som et medium for visuell kommunikasjon som kunne brukes i kunst. Denne oppfatningen ble dannet på grunn av tekniske aspekter og kompleksiteten i prosessen med å forberede hologrammer, som i stor grad begrenser friheten til kunstnerisk skapelse, da den er bestemt av en teknisk faktor. Etter en stund viste imidlertid vitenskapelige miljøer interesse for å fremme holografi blant kunstnere, i håp om at det ville utvikle seg i områder utenfor vitenskapens domene. Personlig er jeg tilhenger av å kombinere disse to feltene, spesielt når det gjelder utdanning, under forutsetning av at vitenskap og kunst kan være komplementære og ha en positiv innvirkning på den didaktiske prosessen, noe som kan bekreftes av aktiviteten til vårt Spatial Imaging Studio.

Den anerkjente polske fotografen og fotografiteoretikeren Stefan Wojnecki skriver følgende: "Hvis en form for kreativ aktivitet skal betraktes som en kunstnerisk disiplin, må den ha spesielle midler for kunstnerisk uttrykk, karakteristiske for denne aktiviteten, som vi kaller autonome midler for kunstnerisk uttrykk."<sup>7</sup> Til tross for at disse setningene ble skrevet i en sammenheng av en uttalelse om fotografi, en eldre søster av holografi, er det nettopp på grunn av denne slektskapen at vi kan anvende dem også på holografi, som utvilsomt oppfyller dette kriteriet. Nå er holografi nesten femti år gammel og relativt etablert til tross for å være en svært ung kunstnerisk disiplin. Selv om holografi forblir en nisje disiplin, tror jeg at etablering og utvikling av studioer lignende vårt holografiske laboratorium bidrar til videre utvikling og popularitet, spesielt innen kunst.

Det skal huskes at holografi bare er et verktøy som brukes av en kunstner som til slutt bestemmer hvordan det skal brukes. Jeg mener at en kreativ tilnærming til kunstnerisk aktivitet ved bruk av holografi innebærer nødvendigheten av en konstant søken etter nye metoder for å bruke et holografisk bilde og gjennomføre utallige eksperimenter på hvert trinn i arbeidet med et hologram, det vil si under prosessen med å forberede situasjonen som skal holograferes, samt under utførelsen av eksponeringen og planleggingen av den endelige presentasjonen.

### **Tekniske metoder og kunstneriske midler brukt i noen eksempler på kunstverk**

Eksemplene som diskuteres nedenfor er hovedsakelig kunstobjekter laget av studenter under kursene ved UAP Spatial Imaging Studio, samt individuelle kunstneriske realiseringer av forfatteren. Utvalget av eksemplene er bestemt av intensjonen om å vise ulike metoder for å bruke hologrammer i kunstobjekter og utnytte dets egenskaper som har en nøkkelinneffekt på opplevelsen av installasjonen. Kunstneriske aspekter er av sekundær betydning her.

#### **1. Rekonstruksjonslys (metoder for å rekonstruere hvitt lys-hologrammer og regnbue-hologrammer)**

Nødvendigheten av å bruke rekonstruksjonslys kan betraktes som en ulempe som hindrer eksponeringen betydelig, grunnen til dette er det faktum at rekonstruksjonen innebærer nødvendigheten av å bruke en ekstern lyskilde som bestemmer lesbarheten av et rekonstruert hologram. (Dette gjelder spesielt for større hologrammer som krever en lang avstand mellom kilden til rekonstruksjonslys og hologrammet for å holde vinkelen på spredning så liten som mulig). I eksemplene som diskuteres nedenfor, ble nødvendigheten av å bruke rekonstruksjonslys brukt som en fordel og et nøkkelelement i et kunstobjekt.

##### *1.1. Statisk rekonstruksjonslys og statisk hologram*

---

<sup>7</sup> Stefan Wojnecki, *My theory of photography*, University of Arts in Poznań, Poznań 1999, s. 16.



Fig. 33–34. Małgorzata Witaszak, uten tittel, 2012; hologram, vindusramme, knust glass; gul rekonstruksjonslys.

Et gjennomsiktig hvitt lys-hologram, plassert i en gammel trevindusramme, av en skulptur av en kvinne som ser ut av et vindu, er hovedelementet i installasjonen. Sammensetningen av installasjonen som er plassert på gulvet gir inntrykk av en tilfeldig rot. Rekonstruksjonslyset stråler ned på installasjonen vertikalt, og hologrammet er



vinklet med en vinkel på 340 grader med vertikalen, slik at det rekonstruerte bildet bare er synlig når betrakteren står ansikt til ansikt med det på et strengt definert sted. Å bruke en overraskelseeffekt er hovedantagelsen til installasjonen. Når hologrammet sees fra en vinkel som hindrer projeksjon, gir det inntrykk av en kjedelig, skitten og dempet vindusrute. Betrakteren kan oppfatte det fullt ut bare når de befinner seg innenfor projeksjonsområdet.



Fig. 35. Karolina Machnicka, uten tittel, 2012; hologram, stållamme, messing; gul rekonstruksjonslys.

Kunstnerisk gjennomføring innlemmer en messing-skjematisk skulptur av en fugl som "ser" på sitt holografiske speilbilde. Konseptet består i en sammenstilling av et virkelig objekt (en messing-skulptur) med et illusorisk objekt rekonstruert i et hologram. Dette er et eksempel på bruk av et hologram som et element i en kompleks installasjon, som kombinerer ulike kunstfelt (skulptur og holografi) som er perfekt komplementære i denne konfigurasjonen.

### *1.2. Bevegelig rekonstruksjonslys og statisk hologram*

I tilfeller der bevegelig rekonstruksjonslys og statiske hologrammer brukes, legges vekt på dynamikken som lyskilden bringer inn i opplevelsen av hologrammet. Den statiske naturen til hologrammet forblir uendret, mens bevegelsen av rekonstruksjonslyset gir betrakteren muligheten til å utforske forskjellige perspektiver og detaljer ved å endre lysvinkelen.

Denne tilnærmingen kan brukes til å skape en interaktiv opplevelse der betrakteren har kontroll over hvordan hologrammet blir oppfattet. Bevegelig rekonstruksjonslys gir kunstneren muligheten til å leke med lysdynamikk og skape varierte visuelle effekter som endrer hologrammets opplevelse avhengig av belysningsvinkelen.



Fig. 36–37. Jarosław Bogucki, Fish Bowl, 2010; hologram, stål, belysningssystem; grønt rekonstruksjonslys.

Den kunstneriske gjennomføringen er en installasjon som kombinerer en skulptur med hologrammer, der hvitt lys-hologrammer i former av uregelmessige geometriske figurer, satt i en stålramme, er hovedelementet. De anvendte hologrammene er bilder av en stålskulptur av en fisk tilhørende familien Ceratiidae.

Installasjonen utnytter egenskapene til et hologram som fører til en alvorlig begrensning, nemlig egenskapene som følger av en krevende form for eksponering, der et bilde vises under nøye definerte lysforhold. I denne installasjonen er reproduksjonslyset en innebygd del av helheten for å direkte involvere betrakteren i prosessen med hologramreproduksjon ved å "fusjonere" dem med belysningssystemet. Besøkende på utstillingen fikk spesielle hjelmer for arrangementet, med integrerte lyskilder hvis form hentydet til den holograferte fisken, det vil si lignet på deres bioluminescerende lyskilde. Dette resulterte i at bildet som dukket opp fra et hologram ble bestemt av plasseringen av betrakteren på grunn av vinkelen der bildet ble sett. Betrakteren ble derfor en uunnværlig del av installasjonen.

### 1.3. Statisk rekonstruksjonslys og bevegelig hologram



Fig. 38. Jarosław Bogucki, Mellom illusjon og virkelighet, 2011; hologram, stål, syntetisk harpiks, elektrisk motor; gul rekonstruksjonslys.

Installasjonen har to grunnleggende elementer, en skulptur og hologrammer. Skulpturen viser en gruppe livaktige figurer, med vilje representert grovt og skjematisk. Dette er representasjoner av en kvinne, en mann og et barn: realistiske, men uten detaljer. De skulpterte figurene har ingen hoder. Gruppen er omgitt av en bevegelig metallbånd med festede hologrammer av portretter av fire personer - en kvinne, et barn, en middelaldrende mann og en gammel mann. En lysstråle, et element av nøkkelbetydning, lyser opp gruppen fra bare en side, frontalt, mens resten av komposisjonen holdes mørk. Kilden til en konsentrert lysstråle gjør også de holografiske bildene synlige. Bildene vises

imidlertid bare etter tur i en stund når lysstrålen lyser opp et av hologrammene som roterer sammen med båndet.



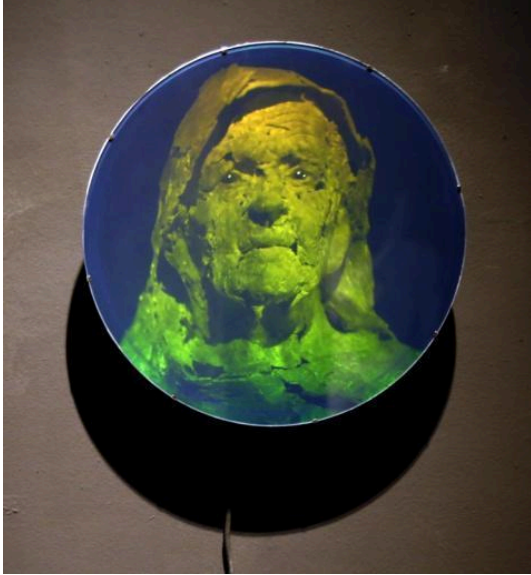


Fig. 39–40. Jarosław Bogucki, Sirkel, 2016; hologram, stål, syntetisk harpiks, elektrisk motor; hvitt rekonstruksjonslys.

Hologrammet viser seks separate skulpturportretter synlige etter tur under rotasjon. Hver blir rekonstruert en stund når det roterende hologrammet er plassert i riktig vinkel i forhold til den statiske rekonstruksjonsstrålen. En karakteristisk egenskap ved hologrammet er prosessen med å lyse opp hvitt lys-hologrammet som består av seks separate overføringshologrammer. Under eksponering ble hvitt lys-hologrammet rotert med 60 grader i forhold til det neste overføringshologrammet.

## **2. Rekonstruksjonslysets farge (rekonstruksjon av hvitt lys-hologram)**

Hvitt lys-hologram blir vanligvis rekonstruert ved hjelp av hvitt lys, som består av elektromagnetiske bølger av forskjellige lengder. Det anbefales å rekonstruere et monokromatisk hologram med en rekonstruksjonsbølge separert fra hvitt lys (for eksempel kan et grønt hologram gjengis med lys av samme farge). Fordelen ved å bruke riktig lydfarge, tilpasset et gitt hologram, kommer særlig fra forbedring av kontrasten og begrensnig av overflødig lys som forårsaker skadelig belysning av situasjonen. Å bruke denne løsningen er spesielt gunstig i noen komplekse prosjekter, der et hologram er et element i en større romlig komposisjon, samtidig som rekonstruksjonslyset er ansvarlig for riktig belysning av situasjonen. De fleste eksemplene presentert i denne teksten (med unntak av to unntak) blir rekonstruert ved hjelp av en kilde til monokromatisk lys.

## **3. Rekonstruksjon utført med varierende farget lys (rainbow-hologrammer og fargede hvitt lys-hologrammer)**

### *3.1. Rainbow-hologram rekonstruert med varierende lys*





Fig. 41–42. Joanna Sapkowska, Liten Ponni, 2013; regnbuehologram, leketøy; flerfarget rekonstruksjonslys.

Denne kunstneriske gjennomføringen viser et hologram av en modell av en vinkelrett tunnel med et element av en virvel oppnådd ved å rotere hvert segment i forhold til det foregående, med et ferdig objekt, nemlig en Little Pony-leke. Rekonstruksjonslyset som

ble brukt i presentasjonen, endret seg jevnt fra en farge til en annen i hele spekteret av grunnfarger. Når lys med skiftende bølgelengder ble brukt, ble noen elementer av bildet synlige, mens andre forsvant i horisontale striper som er karakteristiske for regnbuehologrammer.

### 3.2. Hvitt lys-hologram, delvis farget, rekonstruert med skiftende farget lys

En effekt lignende den som oppnås med et regnbuehologram, kan oppnås ved å rekonstruere et hologram delvis farget med lys av skiftende farge.



Hvitt rekonstruksjonslys



Grønt rekonstruksjonslys



Rødt rekonstruksjonslys



Gult rekonstruksjonslys

Fig. 43–46. Dorota Gralewka, uten tittel, 2015; hvitt lys regnbuehologram; flerfarget rekonstruksjonslys.

"Jeg brukte et hologram i installasjonen min som omhandler minner og hukommelse. I en modell av omtrent samme størrelse som B2-papirformatet plasserte jeg fotografier relatert til viktige hendelser eller aspekter av livet mitt. Fotografiene ble plassert på rør i ulike høyder for å understreke 3D-effekten av hologrammet. Jeg brukte hologrammer i ulike farger, derfor synlige i forskjellige bølgelengder. Noen fotografier kunne bare sees i grønt lys, noen i rødt lys, mens andre i oransje lys. Under eksponeringen av

hologrammet brukte jeg variabelt lys slik at fotografier i en bestemt farge bare var synlige et øyeblikk, til lysfargen endret seg. Noen fotografier var nærmere betrakteren, andre ble sett på større avstand, noen var synlige på et gitt øyeblikk, mens andre ikke var det, noe som etter min mening reflekterte menneskets livsforløp og tilbakevending til minner, men også følelsen av flyktighet. Et bilde som ser ut til å ha vekt og form, virker som et ekte objekt, men på den annen side er det helt utilgjengelig for vår følesans, noe som resulterer i en konstant følelse av muligheten for permanent kontakt og samtidig en følelse av utilfredshet."<sup>8</sup>

#### 4. Multiple belysning av en overføringshologram



Fig. 47. Jarosław Bogucki, Dobbeltportrett.

Hologrammet er et portrett av to personer "sammensmeltet" til én. Metoden som er brukt, innebærer dobbel belysning av et overføringshologram av to ulike personer, sammen med en endring av retningen til objektstrålen: strålen lyser vekselvis bare en side av hver modell, fra venstre og fra høyre.

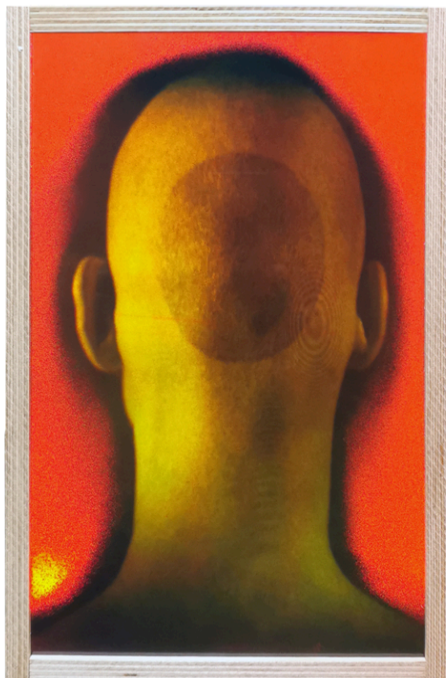
---

<sup>8</sup> Dorota Gralewska, kommentar om implementeringen, 2018.

5. Utnyttelse av gjennomsiktigheten til holografisk film







Figs. 48–49. Szymon Zwoliński, uten navn (holografiske selvportretter 1, 2) fra serien Burnout, 2019–2020; hologram, bevegelig mekanisme, treinnramming.

Kunstobjektet ble laget i en syklus på tre elementer. Det består av trerammer/bokser med en mobil mekanisme plassert inni for å gi inntrykk av et opplyst bål, og hologrammer. Hologrammet viser en mannlig figur i et portrett tatt forfra og (to ganger) bakfra. Hologrammet fanger også karakteristikkene til den portrettede personen, som en tatovering der den portrettede personens ansikt vises igjen. Innenfor bildet er det fargeflekker som ligner naturlig hudpigmentering, plassert i det øvre frontale området og omkring konturen av figuren. Takket være den mobile mekanismen som er brukt inni, gløder et internt bål på flekkene. Det gir inntrykk av å være ekte, men forblir en optisk illusjon. Hologrammene som viser mannen, ble belyst med gult lys.





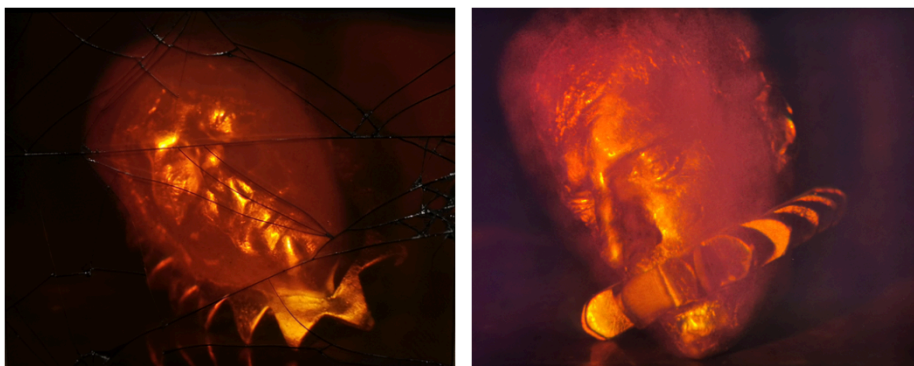
Fig. 50. Szymon Zwoliński, uten navn (holografiske selvportretter 3) fra serien Burnout, 2019–2020; hologram, bevegelig mekanisme, treinnramming.

Dette verket, som også består av tre elementer, bruker de samme materialene, dvs. en treboks med en mekanisme og et hologram. Her viser hologrammet en skulptur av et deformert mannsansikt, flatt og liggende på siden. På nivået av øyehulene er hele hodet omgitt av et belte laget av geometriske blokker som etterligner en krone. Skjulingen av figurens øyne og det uidentifiserte beltet som omgir skulpturen, skaper uro. Den optiske illusjonen av brenning, oppnådd gjennom en mekanisme brukt inni boksen, ble oppnådd ved å belyse kunstobjektet med rødt lys.



Fig. 51. Szymon Zwoliński, Uten tittel (1) fra serien I don't see, I don't speak, I don't hear, 2019–2020; hologram, bevegelig mekanisme, treinnramming.

Et annet hologram i serien viser en skulptur av et deformert mannsansikt, der en geometrisk stripe går i ørehøyde. Prosjeksjonen som etterligner ild ble oppnådd ved hjelp av en mekanisme plassert inne i installasjonen. Hologrammet er ødelagt. Det siste hologrammet i serien er også et skulpturert mannshode; her er en geometrisert bånd laget av moduler plassert i munnhøyde.



Figs. 52–53. Szymon Zwoliński, Uten tittel (2, 3) fra serien I don't see, I don't speak, I don't hear, 2019–2020; hologram, bevegelig mekanisme, treinnramming.

### **Avsluttende kommentarer**

Holografi åpner opp for et bredt spekter av kreative muligheter. Det er avgjørende at vi ser hvor mye vi kan oppnå ved å bruke denne teknologien og hvor lite vi egentlig vet om den. Denne disiplinen har et enormt potensiale, noe jeg stadig er klar over, og jeg oppdager konstant nye måter å benytte hologrammer på. Eksempelene presentert ovenfor utgjør bare en liten del av det brede spekteret av bruksområder for hologrammer i kunstneriske realiseringer som overstiger grensene for tradisjonelle metoder. Hvordan et hologram vil bli brukt og i hvilken kontekst det vil bli plassert, avhenger av kreativiteten og det skapende potensialet til den enkelte kunstneren.

Vi må være oppmerksomme på publikumet for kunstneriske holografiske realiseringer. Intensiteten av kontakt mellom betrakteren og kunstneriske realiseringer med bruk av hologrammer blir ofte forsterket av et element av overraskelse som oppstår på grunn av manglende kunnskap om holografi og fascinasjonen som oppstår ved første kontakt med denne teknologien. Noen ganger kan det brukes ved planlegging av en kunstnerisk realisering og passende utstilling, da det gir kunstobjekter en magisk aspekt. Dessverre oppfattes et hologram av den gjennomsnittlige betrakteren som en uvanlig og overraskende form, noe som ofte hindrer å gå utover overflaten av en kunstnerisk realisering for å oppnå nivået av analyse og dypere tolkning. Når en betrakter fokuserer bare på det ytre, formelle aspektet av et bilde, betrakter de et hologram som en kuriositet og gjør ikke en innsats for å tolke kunstnerens intensjoner. Kunstneriske realiseringer møtt av betraktere med en slik tilnærming oppfattes derfor ikke som kunst og reduseres til meningsløse objekter ment å gi overraskelse og underholdning, uten intensjon om å vekke refleksjoner om verden og mennesket som lever i den.

For meg er et hologram langt mer enn en tro kopi av et fragment av den virkelige verden. Det gir oss muligheten til å stoppe tiden, fange og registrere en virkelig situasjon i form av et frosset, livløst og bevegelsesløst bilde som kan sees uten begrensninger. Når man står overfor et hologram, kan man få inntrykk av full kontroll over tiden. Denne illusjonen forsterker inntrykket av å møte en annen enhet som styres av lover som er i strid med våre egne, et vindu som gir innsikt i en annen dimensjon, inn i en verden uten mangfoldige farger, monokrom, men samtidig bestemt av én intens farge som forsterker følelsen av uvirkelighet. Det er nettopp denne egenskapen som gjør et hologram til et svært attraktivt kunstnerisk medium. Denne funksjonen må imidlertid ikke være det eneste kriteriet som tas i betraktning når man vurderer et hologram som et kunstnerisk uttrykksmiddel. En kunstner må finne en metode for å bruke et hologram der det er den eneste mulige formen for kunstnerisk realisering.

## DENISYUK-HOLOGRAFIER — PRAKTISK BRUK

Holografisk laboratorium ved Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan har utstyret som gjør det mulig å lage såkalte Denisyuk-holografier selv uten profesjonelt holografisk utstyr. Ved å bruke et relativt enkelt optisk system og en vanlig laserpeker kan små holografier lages. (For en detaljert beskrivelse av Denisyuk-holografier, se Holografi, del 8, Reflekterende og Denisyuk-holografier).

### 1. Konstruksjon av et eksemplarisk sett brukt til å registrere Denisyuk-holografier

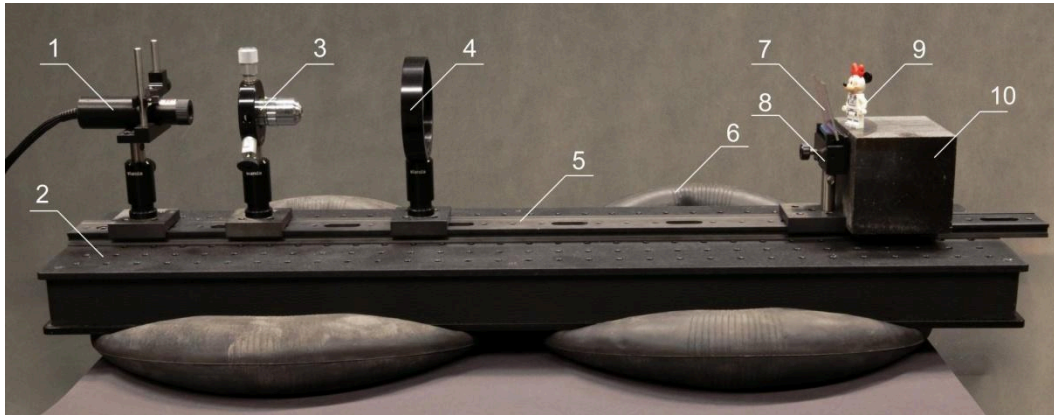


Fig. 54. Et eksempel på et sett brukt for å registrere Denisyuk-holografier: 1. en diodelaser (peker-type), 2. den optiske bordplaten, 3. et mikroskopobjektiv, 4. en plan-konveks linse, 5. en optisk skinne, 6. en vibrasjonsabsorber (for eksempel en sykkelhjulslange), 7. en glassplate med holografisk film, 8. en monteringsbrakett, 9. et holograferingsobjekt, 10. en stabil base (for eksempel en granittkub).

### 2. Opptaksmaterialet: Fargefotopolymer Bayfol® HX 200

Vi bruker en fotosensitiv fotopolymerfilm som kan brukes til å lage hologrammer som kan sees i hvitt lys (reflekterende hologrammer). Bayfol HX 200 kan brukes når du bruker laserlys i det synlige bølgelengdeområdet, dvs. 440–680 nm. Ingen ytterligere behandling er nødvendig for å lage et hologram, det vil si verken våtbehandling (det vil si ingen fotokjemisk prosess brukes) eller varmebehandling. Etter at hologrammet er eksponert, er det imidlertid nødvendig med eksponering for kortbølget lys (ved hjelp av en UV-lampe eller ved eksponering for sollys) for å fjerne følsomheten til områdene som ikke er eksponert for lys. Bayfol HX 200 består av tre lag: et substrat, en fotosensitiv fotopolymer og en beskyttende toppfilm. Substratet er en cellulose triacetat (TAC) film, og den beskyttende overflatefilmen er en polyetylen (PE) film. Den beskyttende filmen kan fjernes fra fotopolymeren. Produktet kan brukes til ulike typer volumetriske hologrammer (se <https://www.geola.com/product/photopolymer/>). Fotopolymerfilm er et utmerket alternativ til sølvhalid holografiske filmer, som krever relativt kompleks, "våt" behandling. Takket være fotopolymerer krever ikke opptakseffekten noen ekstra prosesser etter at hologrammet er eksponert, bortsett fra kort eksponering for UV-bølger. Det betyr at den endelige effekten oppnås umiddelbart etter opptaket av hologrammet. En ekstra fordel er muligheten for å lage hologrammer i tre farger eller en av de valgte fargene, avhengig av bølgelengden til laserlyset som brukes for opptaket -

grønn, rød eller blå.

### 2.1. Forberedelse av materiale for holografi

Tynne glassplater av endelig størrelse må forberedes. Den beskyttende filmen må deretter fjernes fra de utskårne stykkene fotopolymerfilm, og filmen påføres glasset ved hjelp av en myk fotografisk rulle. Det er veldig viktig å gjøre dette i et miljø som er helt fritt for støv og skitt. Det er avgjørende at overflaten på glasset der polymerfilmen påføres, er ren og fri for rusk, selv det minste, da hologrammet kanskje ikke blir registrert der partiklene er til stede, noe som vil resultere i et 'hull' i bildet. Overflødig film utenfor kanten av glasset skal deretter klippes av. Når den er påført, fester filmen seg perfekt til glassoverflaten. Under alle operasjoner bør det legges spesiell vekt på eventuell forurensning som forårsaker dannelse av luftbobler mellom filmen og glasset, da dette er hvor bildet ikke blir registrert. På grunn av filmens følsomhet for lys, må alle operasjoner utføres i mørkeromforhold, og de laminerte platene må beskyttes mot lys. Svakt belysning av mørkerommet med en kilde til langbølget stråling (mørk rød lampe) med lavest mulig intensitet er tillatt.



Figs. 55–57. Forberedelse av materialer. Fra venstre: et sett med grunnleggende verktøy, prosessen med å påføre et ark med fotopolymermateriale på en glassbase, trimming av overflødig film til ønsket størrelse.

## 3. Prosessen med å ta opp et hologram

Det viktigste kravet er å stabilisere opptaksoppsettet så mye som mulig. Den eneste måten å håndtere vibrasjoner på er å bruke som base et materiale som effektivt absorberer eventuelle mikrostøt. I vårt tilfelle brukes delvis luftfylte innerdekk som det enkleste og beviste metoden, der en bordplate med et hologramopptakssystem plasseres. Til tross for bruk av denne metoden for vibrasjonsreduksjon, må det tas forsiktighet for å sikre at opptaket blir utført på et rolig sted, borte fra støt og vibrasjoner som kan komme fra industrielle anlegg, trafikk eller til og med gårdsutstyr og elektrisk verktøy. Manglende overholdelse av disse kravene vil forhindre at hologrammet blir ordentlig registrert. Som med bearbeiding av fotografiske materialer, på grunn av fotosensitiviteten til holografiske materialer, bør alle aktiviteter knyttet til forberedelse av fotopolymerfilm før eksponering utføres under begrenset lys (mørkeromforhold).

### 3.1. Forberedelse av scenen

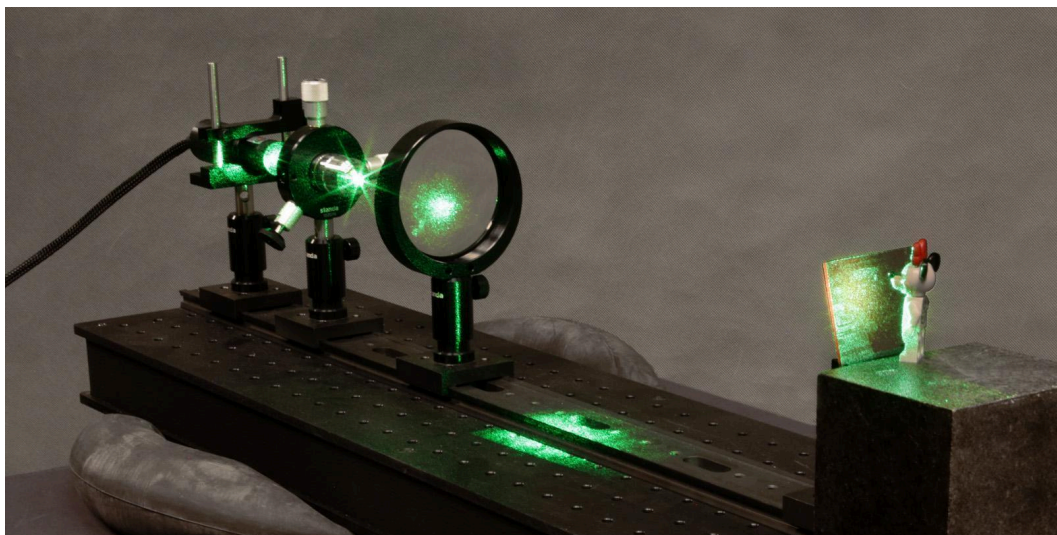
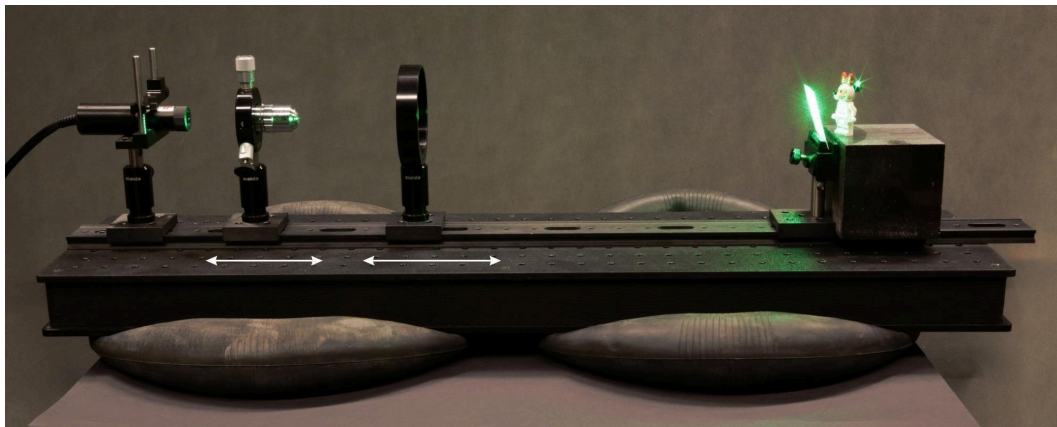
På en stabil base skal det holografiske objektet plasseres så nært som mulig fotopolymerfilmen (det er ønskelig at objektet til og med berører overflaten av opptaks materialet). Holografiske objekter bør være laget av materialer som garanterer en stabil posisjon. Rimelig massive, tunge objekter er best. Når lettere objekter brukes, er det tilrådelig å feste dem forsvarlig til basen. Objekter bør også være så lyse som



mulig for å oppnå best mulig bildegjenoppretting. Dette skyldes at objekter og deler av objekter med lav refleksjon, det vil si mørke, vil være mindre synlige på hologrammet, noe som bør huskes.

### 3.2. Korreksjon av laserstrålen

Ved å plassere en hvit skjerm klippet fra papir i det endelige formatet av hologrammet, i holderen for platen med fotopolymerfilm, kan den korrekte posisjonen for strålen settes. Ved å justere posisjonen til mikroskopobjektivet og den flate-konvekse linsen, kan vi velge graden av spredning og sentrere laserstrålen på akse av hologrammet. I praksis bør det tas hensyn til å belyse holografisk materiale så jevnt som mulig.



Figs. 58–59. Sentrering av laserstrålen på akse av hologrammet.

### 3.3. Plassering av glassplaten med fotopolymerfilm i holderen

En glassplate med fotopolymerfilm plasseres i stedet for papirskjermen, med filmsiden vendt mot det holograferende objektet.



Fig. 60. Et sett brukt for å registrere hologrammer.

#### *3.4. Eksponering av hologrammet*

Av hensyn til strålestabilitet bør eksponeringstiden ikke overstige noen få sekunder. Dette bør justeres eksperimentelt. Under den praktiske økten vil instruktøren gi instruksjoner om eksponeringstiden.

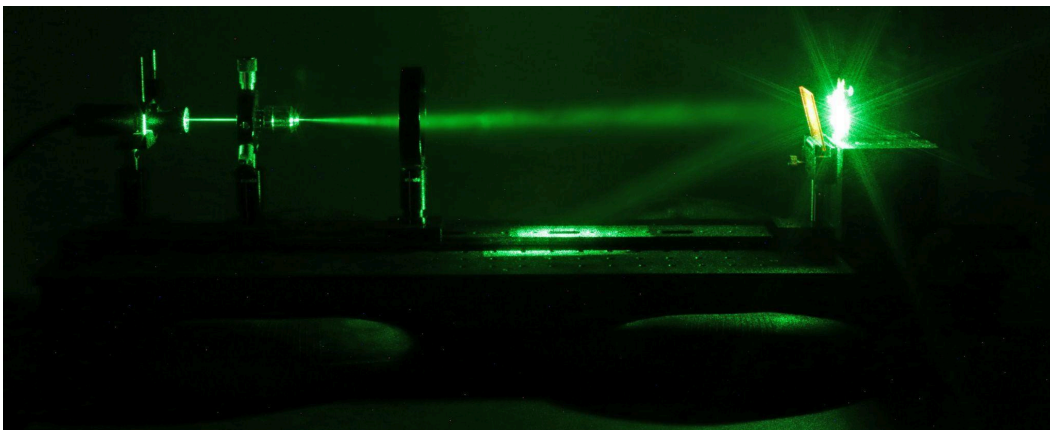


Fig. 61. Eksponering.

#### *3.5. Fiksing av et hologram*

Bildet som er registrert på fotopolymerfilmen, blir fiksert ved kort eksponering for UV-bølger eller sollylys.



Fig. 62. Fiksing av et hologram.

### 3.6. Beskyttelse av hologrammet

Fotopolymerfilm er mottakelig for smuss og skader. En praktisk løsning er å bruke svart plottfilm som beskyttelse — og også som bakgrunn for hologrammet. Den skal påføres jevnt og uten forurensning på siden av glassplaten med fotopolymermaterialet. Denne filmen påføres på en lignende måte som en fotopolymerfilm påføres glasset.

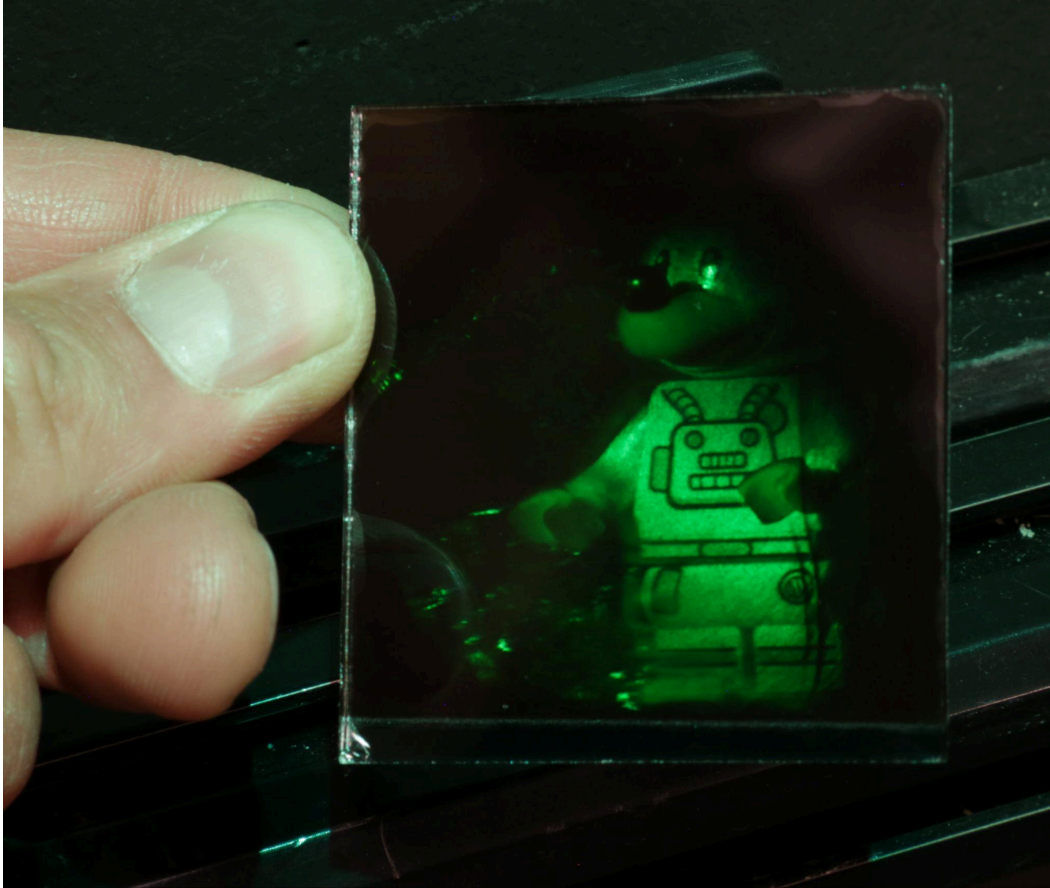


Figs. 63–64. Beskyttelse av et hologram.

### 3.7. Eksempel på hologram

Eksponeeringstid: 6 sekunder.





Figs. 65–66. Et eksempel på et hologram.

### *3.8. Rekonstruksjon av et hologram*

Hologrammet som er registrert i det presenterte systemet, skal rekonstrueres i hvitt, inkohærent lys. For det første bør det sørge for at belysningen for rekonstruksjon er så nær punktbelysning som mulig. Sollys er best for dette, men enkelt-LED-er (hvite) plassert så langt unna hologrammet som mulig, vil også fungere godt. Ikke-punktkilder, som store luminescerende flater, lyspærer med store pærer eller modulære,

multi-kontakt LED-lamper, vil gi et uskarpt eller multiplisert bilde. Det bør huskes at dette ikke er en feil i hologrammet, men bare resultatet av en utilstrekkelig rekonstruksjonsmetode (se kapittel 8).

#### 4. Bruk av Denisyuk-hologrammer i kunstnerisk arbeid, presentert på utvalgte eksempler

##### 4.1. Multiplikasjoner av et hologram

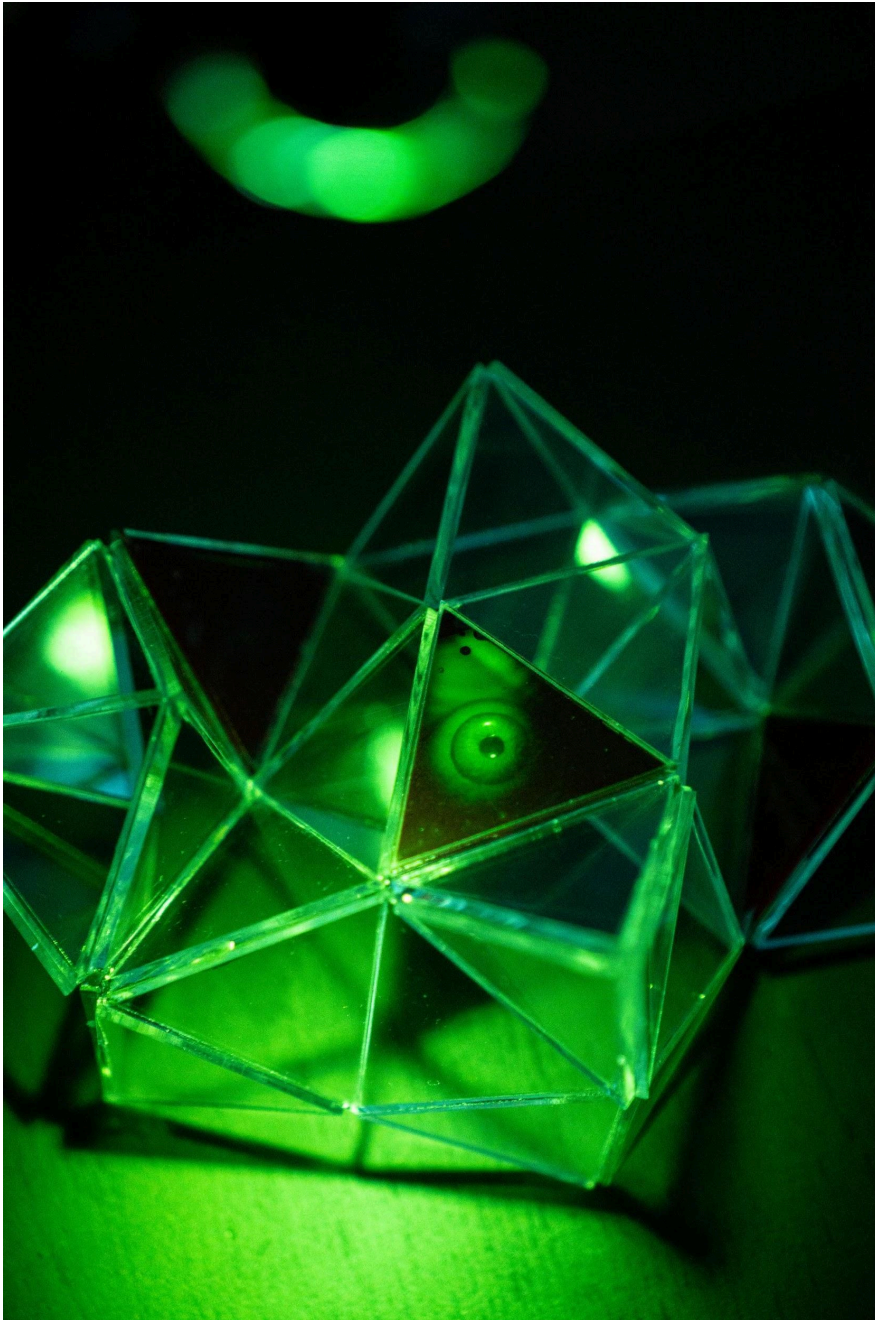


Fig. 67. Olga Kucel, Artifacts, 2023, akrylglass, hologram.



Dette er et romlig objekt laget av trekantede plater av gjennomsiktig akrylglass. Hologrammer av en kunstig øyeeple er plassert på elementene i arbeidet. Kunstobjektet er et eksempel på bruk av et duplisert hologram som et element i en overordnet romlig komposisjon. Ved å plassere hologrammene i de individuelle elementene i den geometriske strukturen, forsterkes inntrykket av solidets romlighet ytterligere av tredimensjonaliteten, dybden i det holografiske bildet. En viktig del av arbeidet er sammenstillingen av den nøkterne, strenge formen til det gjennomsiktige objektet med representasjonen av øyne som stirrer ut i rommet og vekker bekymring.

#### **4.2. Tverrfaglige kunstobjekter**

Når et holografisk bilde brukes dyktig, smelter det godt sammen med kunstverk laget innen ulike kunstfelt. Sammenstillingen av et tredimensjonalt hologram med en todimensjonal representasjon åpner for nye muligheter for kunstnerisk utforskning. Imidlertid bør det huskes at til tross for den tredimensjonale dybden, er et hologram et todimensjonalt objekt.





Figs. 68–69. Jakub Matusewicz, *Selvportrett*, 2023; diptych: olje på lerret, malerilærret, hologram 5×5 cm.

Plassert i midten av lerretet viser hologrammet en tommel som holder en palettkniv på en måte som er karakteristisk for en kunstner. Den malte delen av maleriet viser en del av paletten og en hånd som blander maling med en pensel.





Figs. 70–71. Jakub Matusewicz, Selvportrett, 2023; diptych: olje på lerret, malerilærret med hengsel, hologram 5×5 cm.

Realiseringen ble laget med tradisjonelle maleteknikker kombinert med et hologram plassert i midten av komposisjonen. Hologrammet viser tuppen av en pensel, det primære maleverktøyet. Hologrammet kompletterer bildet som viser forfatteren fanget mens han grunner lerretet.

"I malerier der hovedmotivet er bildet av maleren (mitt selvportrett), tar jeg opp problemet med tilstedeværelsen av et objekt eller en person. Hvis man ønsker å male et realistisk selvportrett, må man bruke et speil, forfatteren må stå foran maleriet. For å lage et fotografi må vi ha modellen foran linsen, og for å lage et hologram trenger vi objekter rett bak den holografiske filmen. To ting er nødvendig hver gang: glass (speilene på linsen, glasset der hologrammet er registrert) og tilstedeværelse. Sammenstillingen av hologrammet, som er et bevegelig bilde, med maleri basert på fotografier, skaper et ganske spesielt forhold. I begge tilfeller er det en imitasjon: enten av hologrammet eller av rommet til 'boksen som inneholder konkrete objekter.'"

(forfatterens kommentar)

#### **4.3. Sammenstilling av ferdige objekter med en holografisk representasjon**

Holografi gir muligheten til å registrere flyktige objekter, utsatt for forringelse og effekter av tiden. Tidligere ble det brukt for å presentere museumsgjenstander, hvis tilstand gjorde det umulig å vise dem i originalen. Bildet som er fanget på holografisk film, er en eksakt reproduksjon av den virkelige modellen, den eneste forskjellen er mangelen på dens fysiske form. Det er en visuell kopi av den frosne i tid.





Figs. 72–73. Magdalena Czapiewska, uten tittel, 2023; trestamme, hologram 5×5 cm.

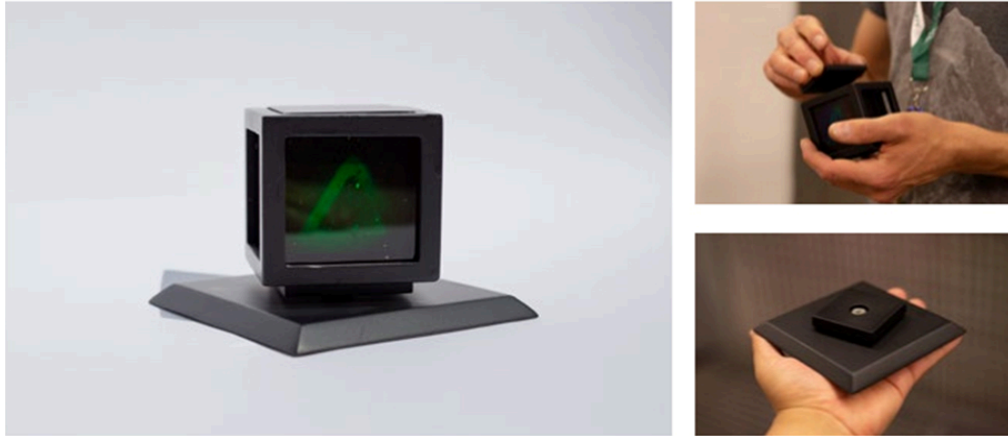
"Objektet er en kombinasjon av den naturlige verden og teknologi. Den døde stammen kommer til live ved å legge til hologrammer på den, som gir inntrykk av bevegelse og liv under barken. Hologrammene viser objekter som er funnet i skogen — lav og kokonglignende planter. Selv om strukturene sett i hologrammene i naturen er på barken eller bare viklet rundt trærne, gir de i objektet 'uten tittel (stamme)' inntrykk av å høre til de indre lagene av treet."

(forfatterens kommentar)

#### **4.4. Bruk av Denisyuk-hologrammer i kunstobjekter med en pedagogisk funksjon**

En ukonvensjonell bruk for Denisyuk-hologrammer ble funnet i studieåret 2022/23 av studenten Rafael Alejandro Muñoz Osorio, som laget et pedagogisk kunstobjekt ved å bruke hologrammer av denne typen som en del av sin masteroppgave om å forbedre visuell-romlige ferdigheter og trivsel for barn med ADHD.





Figs. 74–76. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, ADHD og Holografisk Intervensjon, 2022–23; Denisyuk hologram, tre, maling.

Som Rafael Alejandro Muñoz Osorio påpeker i sin masteroppgave: "Det visuelt-spatiale sansen er en essensiell del av kognitiv bearbeiding og kan spille en nøkkelrolle i forståelse og håndtering av oppmerksomhet hos barn diagnostisert med ADHD (oppmerksomhetsforstyrrelse med hyperaktivitet). Hologrammer tilbyr en fascinerende og interaktiv visuell opplevelse ved å gi seere evnen til å oppfatte bilder fra forskjellige vinkler; dermed stimulerer den visuelt-spatiale sansen på en unik og engasjerende måte."<sup>9</sup>

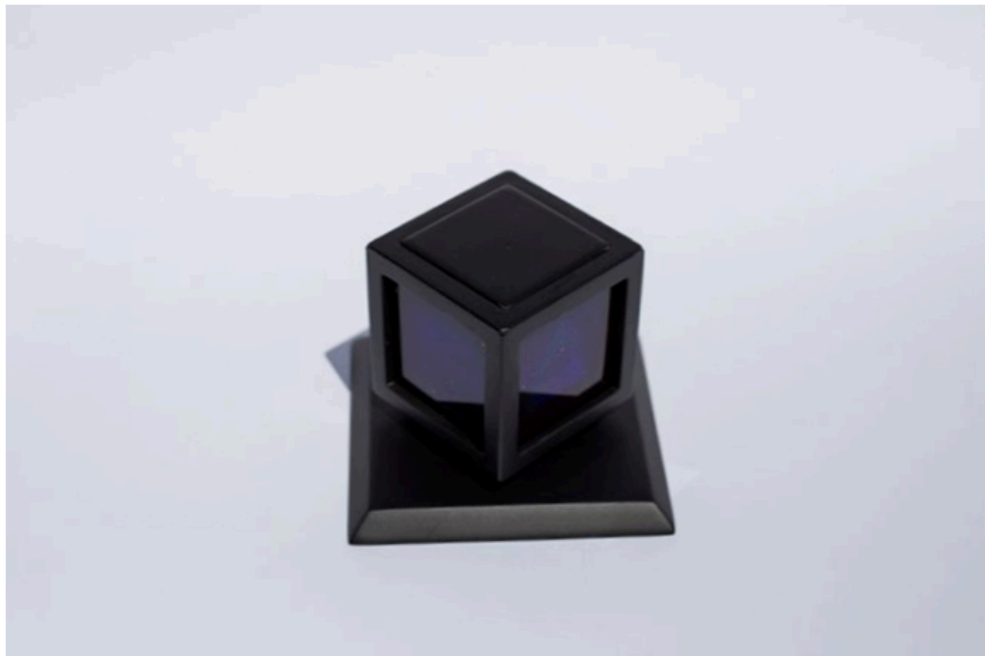
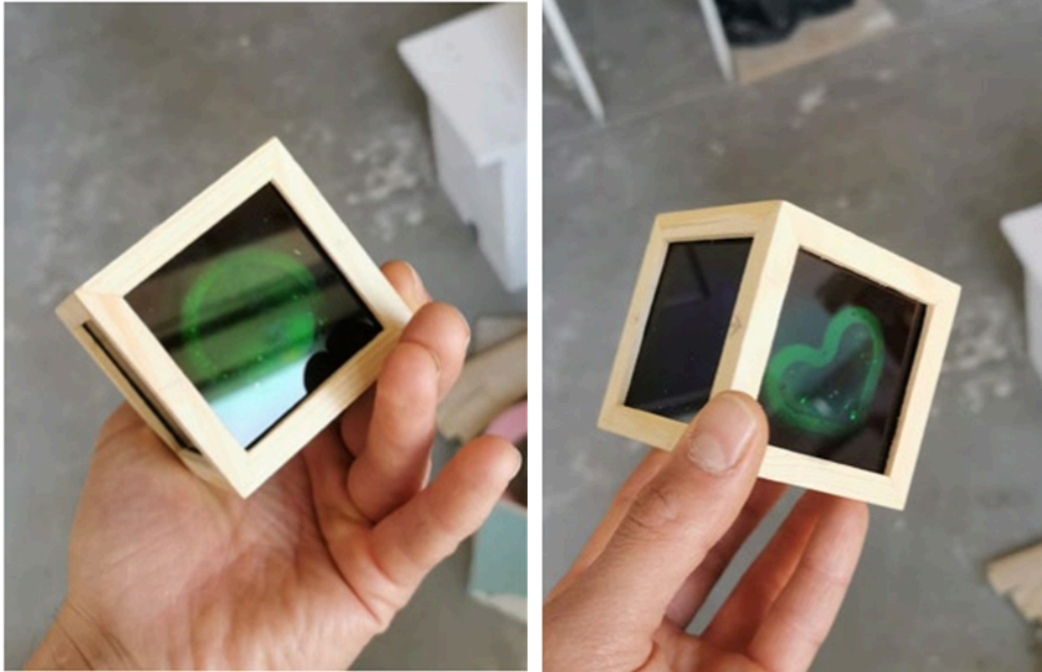


Fig. 77. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, ADHD og Holografisk Intervensjon, 2022–2023; en Denisyuk hologram, tre, maling.

<sup>9</sup> R. Alejandro Muñoz Ostrio, ADHD and Holographic Intervention: Enhancing Visual-Spatial Skills and Overall Being of Children with ADHD (Masteroppgave), s. 7.

Objektet inneholder hele fire Denisyuk-hologrammer. Under interaksjonen analyserer brukeren dem individuelt, dra nytte av den fengslende visuelle opplevelsen som bare kan oppnås ved hjelp av et hologram. En ekstra fordel med objektet er at det kan settes i bevegelse i et tempo valgt av brukeren. Dette resulterer i stimulering av oppmerksomhet, økt følsomhet for den visuelt-spatiale sansen og potensiell lindring av noen av de langsiktige kognitive effektene av ADHD.



Figs. 78–79. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, ADHD og Holografisk Intervensjon, 2022–2023; en Denisyuk hologram, tre (som fotografert før det ble malt).

Opprinnelig fra Guatemala, men studerer i Tyskland, bestemte Rafael Alejandro Muñoz Osorio seg for å lage denne typen kunstobjekt fordi han under sin bachelorgrad frivillig hjalp mennesker med flyktningbakgrunn, blant dem møtte han også barn med ADHD. Han ble interessert i hvor vakkert forskjellige vi er og hvordan kreativt arbeid kan forbedre funksjonen til andre.

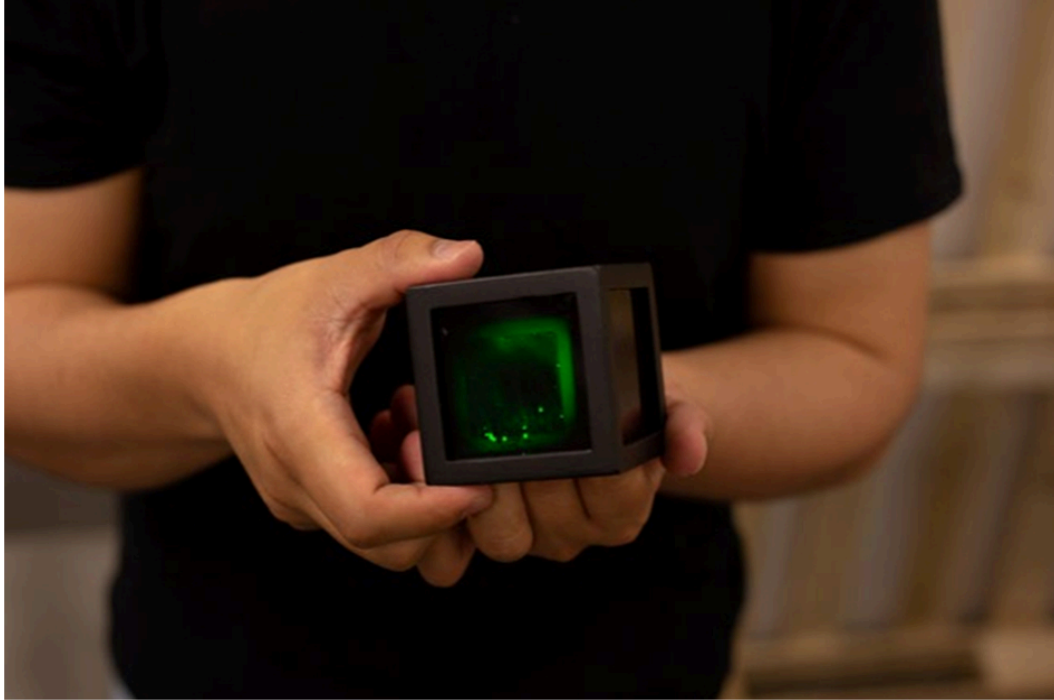


Fig. 80. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, ADHD og Holografisk Intervensjon, 2022–2023; en Denisyuk hologram, tre, maling (det pedagogiske kunstobjektet holdt av forfatteren).

## GLOSSAR

**Aksial holografisk opptak:** Under opptaket sendes to lysstråler (objektstrålen og referansestrålen) ut fra samme punkt.

**Lyskoherens:** Bevaring av en konstant faseforskjell under propagasjonen.

**Kontinuerlig emisjonslaser:** En laser som kontinuerlig sender ut lys.

**Av-aksen holografisk opptak:** Under opptaket sendes to lysstråler (referanse og objekt) ut fra forskjellige punkter.

**Parallakse:** Evnen til å se hologrammet fra forskjellige punkter; vertikal parallakse — evnen til å se hologrammet fra punkter høyere eller lavere i forhold til det; horisontal parallakse er en lignende egenskap horisontalt.

**Pulsert laser:** En laser som sender ut lys i veldig kort tid (på nanosekundordenen).

**Regnbuehologram:** Navnet kommer fra endringen i fargen til hologrammet, avhengig av observasjonsvinkelen; det gjenskapes ved hjelp av hvitt lys.

**Volumetrisk hologram:** Et hologram med et tykt lag av fotosensitivt materiale.

**Bølgeutbredelse:** Spredningen av en bølge under utslipp.

## KILDER TIL FOTOGRAFIER BRUKT I TEKSTEN:

- Fig. 1. Holografisk bildeprojeksjon brukt i filmen Star Wars: Del 4 — Et nytt håp (kilde: [starwars.com](https://www.starwars.com/news/6-ways-holograms-play-an-important-role-in-star-wars; tilgjengelig 18. august 2023)).
- Fig. 2. En lysprojeksjonsmetode brukt til å lage et bilde av et Star Wars-kjøretøy i rommet (kilde: [wired.com](https://www.wired.com/2008/06/usc-lab-creates/; tilgjengelig 18. august 2023)).
- Fig. 3. En 500-zloty-penge seddel fra Polens nasjonalbank, der holografisk sikkerhetselement brukes (kilde: [nbp.pl](https://nbp.pl/banknoty-i-monety/banknoty-obiegowe/500-zl/; tilgjengelig 18. august 2023)).
- Fig. 4. Et bankkort sikkerhetshologram (kilde: [static.turbosquid.com](https://static.turbosquid.com/Preview/000293/674/U0/credit-card-hologram-3d-obj\_D.jpg; tilgjengelig 18. august 2023)).
- Fig. 5. Dameplagg laget av stoffer ved hjelp av fysisk diffraksjonsfenomen (kilde: [ae01.alicdn.com](https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1os9cLXXXXXatXVXXq6xXFXXk/Low-key-luxury-compact-fluorescent-silver-coating-knitted-fabrics-holographic-cloth-laser-Silvering-stretch-knit-fabric.jpg\_640x640.jpg; tilgjengelig 18. august 2023)).
- Fig. 6. Et skateboard med et diffraksjonslag (kilde: [snupdesign.com](https://www.snupdesign.com/wp-content/uploads/2017/02/Holographic-Skateboard-3.jpg; tilgjengelig 18. august 2023)).
- Fig. 7. Et multi-eksponeringshologram laget med en pulslaser: Margaret Benyon, Tigirl (kilde: [holocenter.org](https://holocenter.org)).
- Fig. 8. Et regnbuehologram sett i hvitt lys (kilde: Massachusetts Institute of Technology).
- Fig. 9. Jarosław Bogucki, Narcissus (fotograf fra forfatterens arkiv).
- Fig. 10. Jarosław Bogucki, Word for Word (fotograf fra forfatterens arkiv).
- Fig. 11. Szymon Zwoliński, Untitled (holografiske selvportretter 1, 2) (fotograf fra forfatterens arkiv).
- Fig. 12. Professor Ventsi Sainov viser en Denisjuk hologram av et par nittende århundre pistoler brukt av den russiske hæren (kilde: [worldsworsttourist.com](http://www.worldsworsttourist.com/WWTBulgaria05.htm; tilgjengelig 18. august 2023)).
- Fig. 13. Mieczysław Wolfke (kilde: [ciekawostkihistoryczne.pl](https://s.ciekawostkihistoryczne.pl/uploads/2016/05/Mieczys%C5%82aw-Wolfke.jpg; tilgjengelig 18. august 2023)).
- Fig. 14. Dennis Gabor (kilde: [cultura.hu](https://cultura.hu/wp-content/uploads/2015/06/cultura-gabor-denes-oktat.jpg; tilgjengelig 18. august 2023)).
- Fig. 15. Emmett Leith og Yuris Upatnieks (kilde: [eecsnews.engin.umich.edu](https://eecsnews.engin.umich.edu/wp-content/uploads/sites/2/2019/09/leith-2.jpg; tilgjengelig 18. august 2023)).
- Fig. 16. Den Geola holografiske skriveren (kilde: [geola.com](www.geola.com)).
- Figs. 27–29. Holografisk laboratorium ved Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan (fotografier fra forfatterens arkiv).
- Fig. 30. Holografisk laboratorium ved Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan (fotograf av Ewa Bielańczyk).
- Figs. 31–32. Diagram som viser overføringshologram og hvitlys-hologram eksponering i Holographic Laboratory ved Magdalena Abakanowicz University of the Arts Poznan (fotografier fra forfatterens arkiv).
- Figs. 33–34. Małgorzata Witaszak, untitled (fotografier fra forfatterens arkiv).
- Fig. 35. Karolina Machnicka, untitled (fotograf fra forfatterens arkiv).
- Figs. 36–37. Jarosław Bogucki, Fish Bowl (fotografier fra forfatterens arkiv).
- Fig. 38. Jarosław Bogucki, Between Illusion and Reality (fotograf fra forfatterens arkiv).
- Figs. 39–40. Jarosław Bogucki, Circle (fotografier fra forfatterens arkiv).
- Figs. 41–42. Joanna Sapkowska, Little Pony (fotografier fra forfatterens arkiv).
- Figs. 43–46. Dorota Gralewska, untitled (fotografier fra forfatterens arkiv).
- Fig. 47. Jarosław Bogucki, Double Portrait (fotograf fra forfatterens arkiv).



Figs. 48–49. Szymon Zwoliński, untitled (fotografier fra forfatterens arkiv).  
Fig. 50. Szymon Zwoliński, untitled (fotograf fra forfatterens arkiv).  
Fig. 51. Szymon Zwoliński, Untitled (1) (fotograf fra forfatterens arkiv).  
Figs. 52–53. Szymon Zwoliński, Untitled (2, 3) (fotografier fra forfatterens arkiv).  
Fig. 54. Et eksempelsett brukt til å ta opp Denisyuk-hologrammer (fotografi fra arkivet til Studio 5: Spatial Imaging ved UAP).  
Figs. 55–57. Forberedelse av materialer (fotografier fra arkivet til Studio 5: Spatial Imaging ved UAP).  
Figs. 58–59. Sentrering av laserstrålen i aksen til hologrammet (fotografier fra arkivet til Studio 5: Spatial Imaging ved UAP).  
Fig. 60. Et sett brukt til å ta opp hologrammer (fotografi fra arkivet til Studio 5: Spatial Imaging ved UAP).  
Fig. 61. Eksponering (fotografi fra arkivet til Studio 5: Spatial Imaging ved UAP).  
Fig. 62. Fiksering av et hologram (fotografi fra arkivet til Studio 5: Spatial Imaging ved UAP).  
Figs. 63–64. Beskyttelse av et hologram (fotografier fra arkivet til Studio 5: Spatial Imaging ved UAP).  
Figs. 65–66. Et eksempelhologram (fotografier fra arkivet til Studio 5: Spatial Imaging ved UAP).  
Fig. 67. Olga Kucel, Artifacts (fotografi fra forfatterens arkiv).  
Figs. 68–69. Jakub Matusewicz, Selvportrett, 2023; diptych: olje på lerret, maleriduk, hologram 5×5 cm (fotografier fra forfatterens arkiv).  
Figs. 70–71. Jakub Matusewicz, Selvportrett, 2023; diptych: olje på lerret, maleriduk med hengsel, hologram 5×5 cm (fotografier fra forfatterens arkiv).  
Figs. 72–73. Magdalena Czapiewska, uten tittel, 2023; tre stamme, hologram 5×5 cm (fotografier fra forfatterens arkiv).  
Figs. 74–80. Rafael Alejandro Muñoz Osorio, ADHD og Holographic Intervention (fotografier fra forfatterens arkiv).

Diagrammene som ikke er inkludert i listen, er laget av forfatterne av studien.

ISBN 978-83-66015-66-1