

Holographie nach optischem Aufbau und mit Hilfe eines Computers



Wettbewerb "Jugend Forscht" 2011

Henrike Reinecke (17) und Malte Misfeldt (16)

**Arbeitsgemeinschaft "Jugend Forscht"
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg**

Leitung: StD Thomas Biedermann

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	2
2. Historischer Hintergrund zur Holographie.....	2
a. Was ist Holographie?.....	2
b. Erfinder der Holographie.....	2
3. Grundwissen Holographie.....	3
a. Die Wellennatur des Lichtes.....	3
i. Was ist Licht?.....	3
ii. Beugung.....	4
iii. Interferenz.....	4
b. Kohärenz.....	5
4. Optischer Aufbau von Hologrammen.....	5
a. Material.....	5
b. Versuchsaufbau.....	5
c. Durchführung, Problematiken und Ergebnisse.....	7
d. Aufnahme und Entwicklung.....	9
i. Vorbereitungen.....	9
ii. Die Aufnahme des Hologramms.....	10
e. Wiedergabe.....	10
5. Wechselwirkung von Photonen und Materie.....	11
6. Computergenerierte Hologramme.....	12
a. Was ist ein computergeneriertes Hologramm?.....	12
b. Erstellung eines CGH mit unserem Programm.....	13
i. Die Rechnung für das Interferenzbild.....	13
ii. Vom Bild zum Hologramm.....	15
7. Weiteres Vorgehen.....	15
8. Danksagung.....	16
9. Quellen.....	16

1. Einleitung

Jeder kennt es, das 3D-Kino. Jedoch handelt es sich hierbei nur um eine optische Täuschung, die durch Farbverschiebung und Polarisationsfilter in unserem Kopf hervorgerufen wird. Daher ist es kein echtes, dreidimensionales Bild! Darauf überlegten wir uns, dass es irgendwie möglich sein muss ein echtes 3D Bild herzustellen. Durch Recherchen im Internet kamen wir schnell auf das Thema Holographie. Es faszinierte uns sofort!

In unserer Arbeit versuchen wir, im Gegensatz zur heutigen 3D-Technik, echte Dreidimensionalität mittels optischer- und computergestützter Holographie herzustellen. Dafür haben wir im Laufe der Zeit einen eigenen optischen Aufbau für die Herstellung konstruiert und ein Programm für die Berechnung von computergenerierten Hologrammen geschrieben.

2. Historischer Hintergrund zur Holographie

a. Was ist Holographie?

Als Holographie bezeichnet man den Vorgang, ein dreidimensionales Bild vollständig auf eine zweidimensionale Ebene aufzuzeichnen. Das Wort Holographie kommt aus dem Griechischen („holos“ heißt „ganz, vollständig“; „graphien“ bedeutet „schreiben, aufzeichnen“). Das aufgenommene Bild nennt man Hologramm („gramma“ bedeutet „geschriebenes“ oder „Botschaft“). Im physikalischen Sinne bezeichnet Holographie das Verfahren, dass man die Welleneigenschaften von Laserlicht ausnutzt. Ursprünglich wurde Holographie nur fotografisch durchgeführt, heute ist es jedoch möglich Hologramme rechnerisch zu erzeugen, was unter anderem Inhalt dieser Ausarbeitung sein wird.

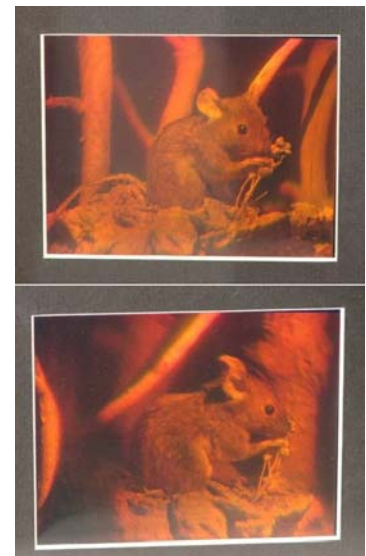


Abb. 1: Ein Hologramm aus verschiedenen Blickwinkeln fotografiert. [1]

b. Erfinder der Holographie

Als Erfinder (Entdecker) der Holographie wird Dennis Gabor bezeichnet, dem es 1948 gelang ein Hologramm herzustellen, während er sich mit einer Arbeit über die Verbesserung von Elektronenmikroskopen beschäftigte. Diese Technik blieb jedoch aufgrund des fehlenden Lasers und des Filmmaterials nur Spezialisten vorenthalten. Als ca. 10 Jahre später der Laser erfunden wurde, erlebte die Holographie einen Boom. Dennis Gabor schaffte es nicht einen Objektstrahl und einen Referenzstrahl durch Interferenz auf einer Fotoplatte festzuhalten, er nutzte die sogenannten „In-Line-Methode“. Das heißt, er hatte alle für sein Hologramm nötigen optischen Elemente in einer Reihe aufgestellt und nutzte nur einen Lichtstrahl. Dieser war auch kein Laser, sondern eine

Quecksilberdampfampe, die durch Lochblenden und Farbfilter erst kohärent wurde. Dies bedeutete jedoch einen enormen Intensitätsverlust.

Heute ist man aufgrund des Lasers nicht länger auf diese Methode angewiesen, es gibt viele andere Möglichkeiten ein Hologramm aufzunehmen.

Da Gabor selbst nicht mit seinen Ergebnissen zufrieden war, wandte er sich zunächst von der Holographie ab. Erst als zwei amerikanische Forscher Gabors Grundideen weiterdachten und hervorragende Ergebnisse erzielten, befasste er sich weiter mit diesem Thema. Die Amerikaner Emmet Leith und Juris Upatnieks führten die Doppelstrahlmethode ein, um einige von Gabors Fehlern und Bildirritationen zu beheben. Auf diese Methoden stützen wir uns noch heute. Gabor wurde 1971 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet, 23 Jahre nach der Entdeckung des Hologramms. In einem Brief an einen Freund schrieb er, dass er sich schäme für solch eine "simple" Erfindung den Nobelpreis zu erhalten, jedoch wissen wir, dass seine Gedanken genauso genial wie einfach sind.

3. Grundwissen Holographie

Um die Entstehung eines Hologramms in ihren Grundsätzen zu verstehen, benötigt man ein Vorwissen über einige Gebiete der Physik, zum Beispiel über das Licht und seine Wellennatur.

a. Die Wellennatur des Lichtes

i. Was ist Licht?

In der Holographie geht man davon aus, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist, die sich wellenförmig nach allen Seiten ausbreitet. Sie besteht aus Energie transportierenden Energieeinheiten (Quanten).

Lichtwellen besitzen ebenso wie mechanische Wellen und Hertzische Wellen eine Frequenz f und eine Wellenlänge λ . Sie breiten sich mit der Lichtgeschwindigkeit c aus.

$c = \lambda \cdot f$	c	Ausbreitungsgeschwindigkeit (<i>Lichtgeschwindigkeit</i>)
	λ	Wellenlänge
	f	Frequenz

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in einem Vakuum beträgt $c = 299792458$ m/s und ist die größte Geschwindigkeit, die in der Natur auftreten kann.

Die Frequenz von Licht ist in allen Stoffen gleich. Sie ändert sich auch nicht, wenn Licht von einem Stoff in einen anderen Stoff übergeht. Dagegen ist die Lichtgeschwindigkeit und damit die Wellenlänge abhängig vom Stoff, in dem sich das Licht ausbreitet.

Die Frequenz bzw. die Wellenlänge des Lichtes bestimmen die Farbe des Lichtes. Diese kann man anhand einer Illustration darstellen (siehe Abb. 2).

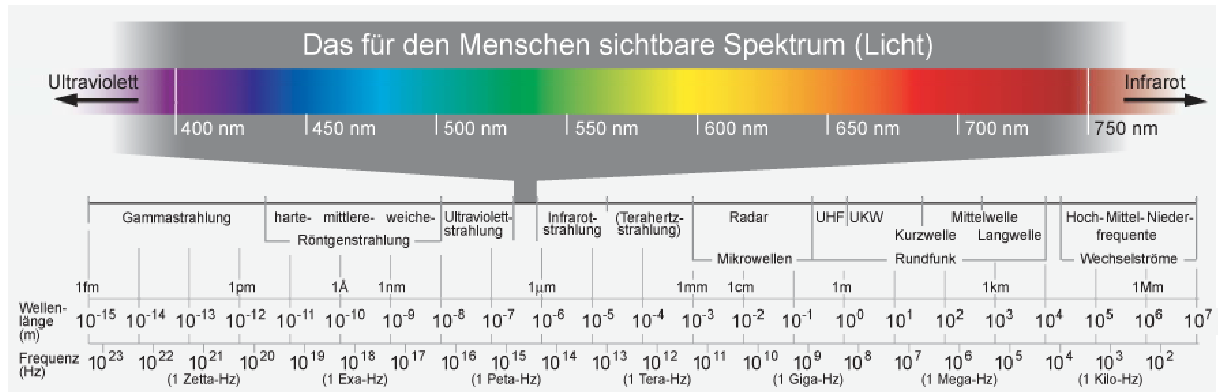


Abb. 2: Spektrum des sichtbaren Lichtes [2]

ii. Beugung

Unter Beugung des Lichtes versteht man die allseitige Ausbreitung des Lichtes hinter Gegenständen, Kanten oder schmalen Platten.

iii. Interferenz

Unter Interferenz versteht man die Überlagerung von zwei oder mehreren Lichtwellen am selben Ort. Dabei kommt es an manchen Stellen zu Verstärkung (konstruktive Interferenz) bzw. Auslöschung des Lichtes (destruktive Interferenz) (siehe Abb. 4).

Aus diesem Grund erkennt ein Beobachter, der die Interferenz von Licht beobachtet, auf einem Schirm ein Muster, bei dem sich helle und dunkle Streifen abwechseln (siehe Abb. 3).

Entscheidend für die Helligkeit des Interferenzbildes an einem Ort ist die Phasenbeziehung zwischen den sich überlagernden Wellen. Sie können die gleiche Phase, entgegengesetzte Phase oder eine beliebige andere Phasenbeziehung zueinander haben.

Zur konstruktiven Interferenz kommt es, wenn die Wellen im Gleichtakt (phasengleich) verlaufen. Dadurch überlagern sich die beiden Wellen, also Wellental mit Wellental und Wellenberg mit Wellenberg. Man bezeichnet sie als konstruktiv, da eine Erhöhung der Intensität des Lichtes eintritt.

Zur destruktiven Interferenz kommt es, wenn eine Phasenverschiebung um 180° vorliegt. Das heißt, dass sich jeweils ein Wellenberg mit einem Wellental der anderen Welle überlagert und es folglich zu einer Auslöschung der Wellen kommt, da sich die Lichtenergien beider Wellen aufheben. Bei anderen Phasendifferenzen tritt

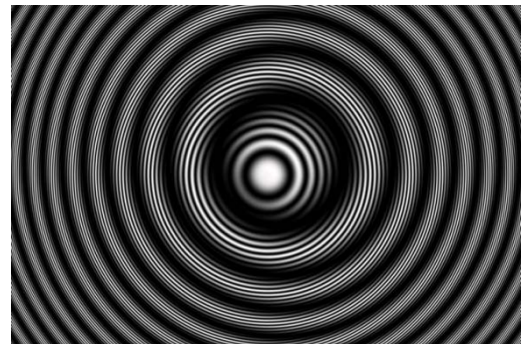


Abb. 3: Berechnetes Interferenzbild zweier Objektpunkte

lediglich eine Abnahme der Intensität ein. Die hellen Streifen entstehen immer dort, wo destruktive Interferenz stattgefunden hat und die dunklen Streifen, wenn sich konstruktive Interferenz ereignet hat.

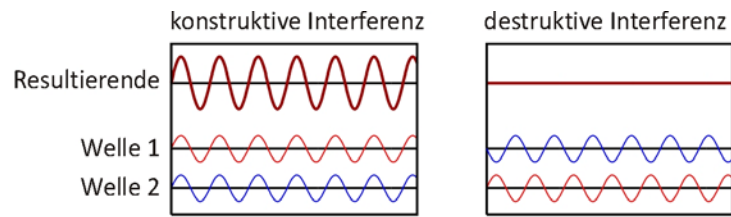


Abb. 4: Konstruktive und destruktive Überlagerung von zwei Wellen [3]

b. Kohärenz

Als Kohärenz bezeichnet man eine Eigenschaft von Licht, über längere Strecken oder Zeitabschnitte phasengleich zu bleiben. Kohärentes Licht breitet sich im Vergleich zu normalem Licht nur in eine Richtung aus. Es wird als Lichtbündel ausgestrahlt mit einer bestimmten Wellenlänge.

Laserlicht weist abhängig von der Bauart und Güte des Lasers sehr große zeitliche und räumliche Kohärenzlängen auf. Außerdem hat es eine wesentlich intensivere Strahlung als gewöhnliches Licht. So kann man schon bei einem kurzen Blick direkt in einen Laser erhebliche Schäden der Netzhaut davon tragen.

Nur mit kohärentem Licht kann man Hologramme erzeugen, da man auf die feste Phasenbeziehung angewiesen ist. Interferenzbilder können nur erzeugt werden, wenn Objekt- und Referenzstrahl die gleiche Wellenlänge haben. Daher nutzt man bei der Holographie einen Laser, dessen Strahl aufgespalten wird. Das Licht eines Lasers ist immer monochrom.

4. Optischer Aufbau von Hologrammen

Als erstes haben wir uns mit dem optischen Aufbau eines Hologramms befasst.

a. Material

1 Alu- Platte	(10 x 80 cm lang, 5 mm dick)
1 Gewindestange M6 mit Muttern und Scheiben	
1 Laserpointer grün	(Laserklasse 2, 532 nm)
2 Halbdurchlässige Spiegel	
1 Oberflächenspiegel	
2 Linsen	(f = 3mm)

b. Versuchsaufbau

Das wichtigste bei einer Apparatur von einem Hologramm ist, dass sie stabil sein muss! Denn bei der Aufnahme eines Hologramms können schon die kleinsten Erschütterungen das Hologramm zerstören. Deswegen bauten wir zu Anfang einen optischen Tisch aus einer Alu-Platte und versahen diese in regelmäßigen Abständen mit Gewinden, damit wir später damit unsere Objektträger befestigen können. Der Vorteil an

unserer optischen Platte ist, dass man den Aufbau zur Aufnahme unseres Hologramms sehr variieren kann. Außerdem können wir unsere Objektträger präziser und genauer ausrichten, um den bestmöglichen Strahlengang einzustellen, was sich wieder positiv auf unser Hologramm auswirkt.

Danach überlegten wir uns, welches Material wir benötigen.

Wir haben uns für einen grünen Laserpointer entschieden, weil der von uns verwendete Film Rot-unempfindlich ist. Er gehört der Laserklasse zwei an und ist wesentlich heller als ein roter Laser.

Als nächstes überlegten wir uns, was für eine Linse am sinnvollsten wäre. Uns war bewusst, dass es eine sehr kurzbrennweitige Linse sein muss, da man den Strahl sehr stark aufweiten muss, um den gewünschten Strahlquerschnitt zu erreichen. Nach längerem Ausprobieren mit verschiedenen kurzbrennweitigen Linsen entschieden wir uns für die Linse mit $f = 3 \text{ mm}$, weil sie den Laserstrahl genügend aufweitet und die Intensität des Laserlichtes nicht verloren geht, außerdem kann man sie gut montieren.

Als nächstes konstruierten wir unsere Objektträger. Also befestigten wir einen Teil unserer Gewindestange an den Spiegeln, Linsen und an dem Laser, sodass sie in ihrer Höhe variierbar sind, um den Strahl genau auffangen zu können und ihn in die richtige Richtung weiter zu lenken. Letztlich befestigten wir unsere Halterungen auf der optischen Bank, in der Form eines Aufbaus eines Optischen Hologramms (siehe Abb. 5).

Das heißt:

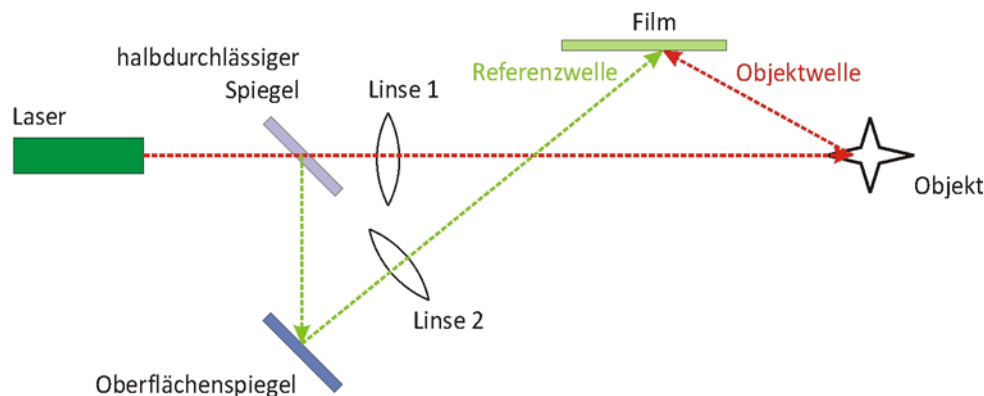


Abb. 5: Erster optischer Aufbau

Hinter dem Laser befindet sich ein halbdurchlässiger Spiegel, der als Strahlteiler dient und den Laserstrahl in Objekt- und Referenzstrahl teilt. Auf dem Objektstrahl folgt nun eine Linse um den Strahl zu einem Lichtbündel aufzuweiten. Danach trifft diese Wellenfront auf das Objekt, von dem sie auf den Film reflektiert wird. Der Referenzstrahl trifft nach dem Strahlteiler auf einen weiteren Spiegel, der ihn in Richtung des Film lenkt. Im weiteren Verlauf trifft der Referenzstrahl auch auf eine Linse, die ihn aufweitet, wie es zuvor schon beim Objektstrahl passierte. Beim Justieren der Linsen musste man darauf achten, dass der Strahl genau orthogonal durch die Linse fällt.

Das Wichtige an diesen Strahlengängen ist, dass sie sich auf dem Film treffen, denn dort entsteht ein Interferenzmuster, das später unser Hologramm sein wird.

Der Objektstrahl hat eine wesentliche unregelmäßigere Struktur als der Referenzstrahl, denn die Wellenfronten werden von dem Objekt durch die Beugung verschieden stark abgelenkt und das bedeutet, dass sich die Phasenwinkel der Objektwellen von Punkt zu Punkt auf dem Film ändert.

c. Durchführung, Problematiken und Ergebnisse

Zu Anfang justierten wir unsere Objektträger gemäß des Aufbaus eines Transmissionshologramms auf dem optischen Tisch, jedoch trafen sich Referenz- und Objektstrahl nicht in einem Punkt. Daher justierten wir unseren Aufbau des Öfteren um und sahen schnell, dass es an der Entfernung der Spiegel zueinander lag.

Ein weiteres großes Defizit unserer Apparatur war, dass der Referenzstrahl im Vergleich zum Objektstrahl zu hell war.

Das ist ein großer Nachteil, weil der Referenzstrahl die Helligkeit des Objektstrahls überdeckt und so die verschiedenen Strukturen des Objektstrahls nicht zur Geltung kommen, dadurch kann ein unbrauchbares Interferenzbild entstehen. Dies passierte, weil der Reflektionsgrad des Spiegels höher war als der des Objektes. Daher entschieden wir uns dafür, die Linsen in der Apparatur anders anzuordnen. Wir versetzten Linse 1 zwischen den Laser und den Strahlenteiler und nahmen die zweite Linse komplett raus, weil wir vermuteten, dass so der Referenzstrahl schwächer würde wenn er vor dem Spiegel aufgeweitet wird. Diese Vermutung erwies sich als falsch.

Wir machten verschiedene Versuchsreihen mit verschiedenen Objekten, um die Helligkeit des Referenzstrahls zu verringern. Einmal setzten wir statt eines richtigen Spiegels einen halbdurchlässigen Spiegel ein und verdunkelten die Rückseite mit schwarzer Pappe, jedoch war der Reflektionsgrad des halbdurchlässigen Spiegels immer noch zu hoch. Als nächstes ersetzten wir den Spiegel durch einen Objektträger bzw. ein Deckgläschen. Dieser Versuch scheiterte daran, dass beide keine Oberflächenspiegel sind, wodurch der Laser an Vorder- und Rückseite reflektiert wurde und so ein Interferenzbild dünner Schichten allein durch den Referenzstrahl entstand.

Letztendlich setzten wir wieder den Oberflächenspiegel ein und weiteten diesen Strahl ein weiteres Mal auf, indem wir Linse 2 zwischen den Spiegel und den Film einsetzten (siehe Abb. 6). Dies brachte noch immer nicht den ausreichenden Effekt, da der aufgeweitete Referenzstrahl nicht nur durch die Linse strahlte, sondern auch an der Linse vorbei, direkt auf den Film.

Daher verdunkelten wir mit schwarzer Pappe den Bereich um die Linse (siehe Abb. 7). Es schien so, als hätten wir nun den erwünschten Effekt. Eine Messung mit einem Luxmeter bestätigte uns dies. Wir maßen jeweils die Helligkeit des Referenz- und Objektstrahls mit verschiedenen Objekten. Wir nutzten eine Hand, ein weißes Blatt Papier und schwarze Pappe. Bei allen drei Versuchen kam heraus, dass der Objektstrahl nun endlich heller ist als der Referenzstrahl.

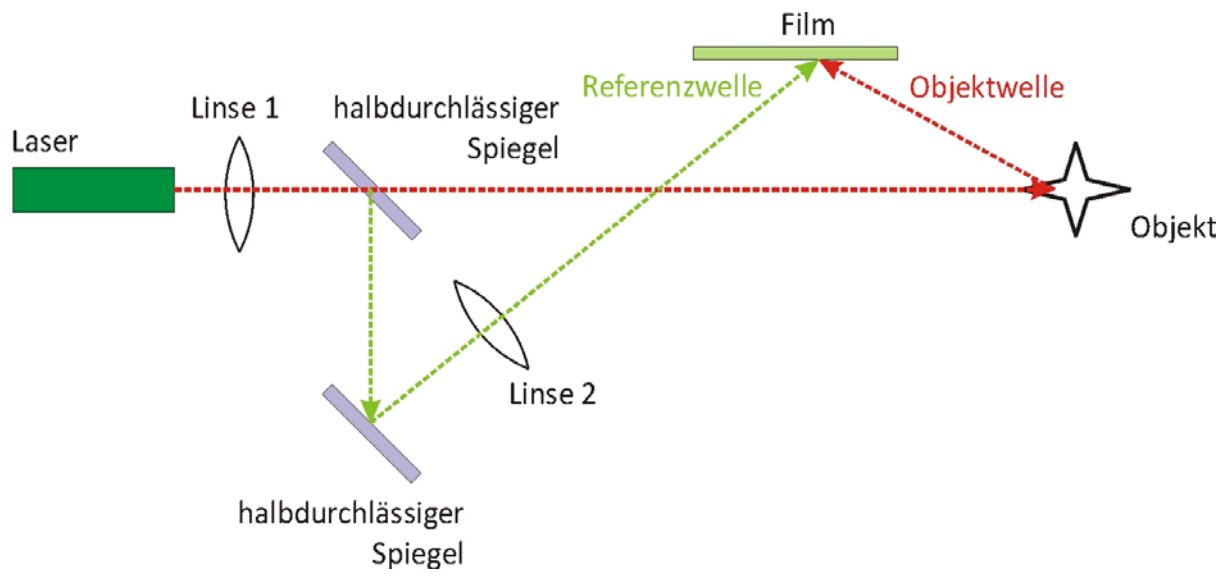


Abb. 6: Endgültiger optischer Aufbau

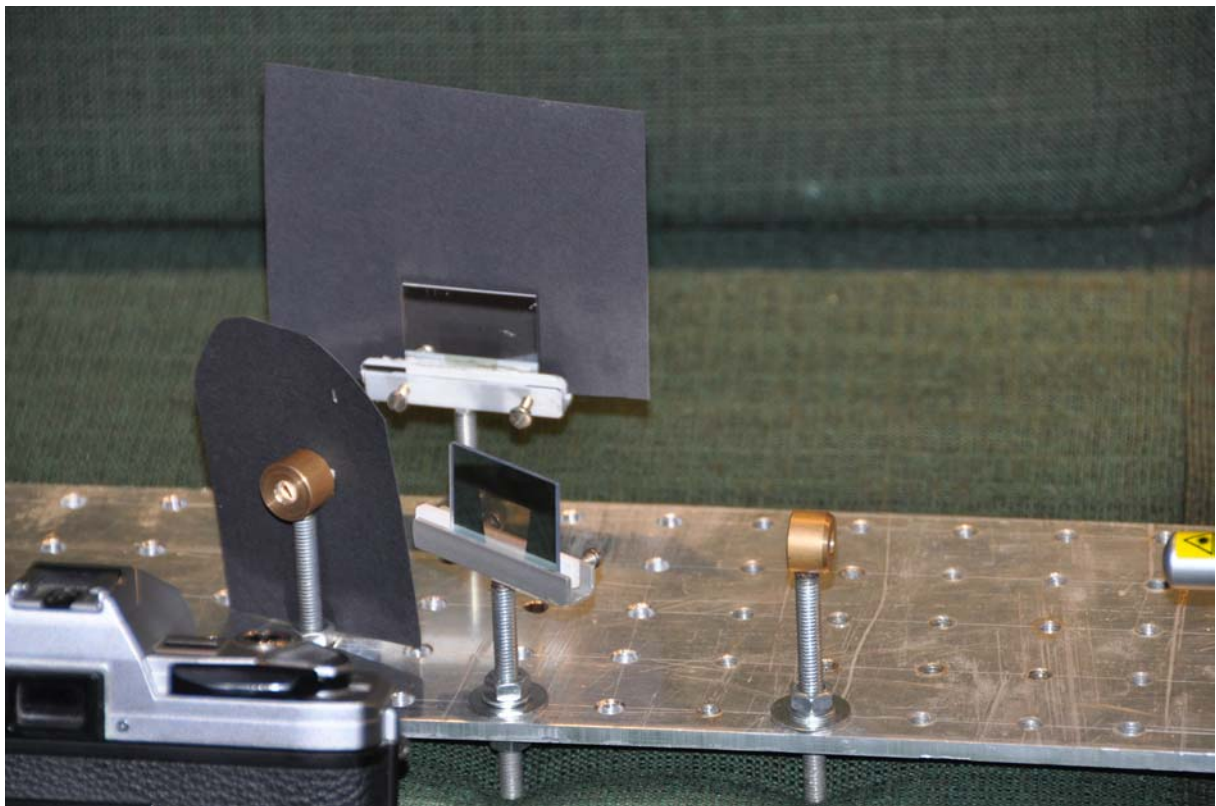


Abb. 7: Foto des optischen Aufbaus

d. Aufnahme und Entwicklung

Nun kommen wir zum Ziel unseres Projektes: die Aufnahme und Wiedergabe unseres Hologramms.

Leider haben wir es bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht geschafft ein Hologramm aufzunehmen, obwohl es ein sehr wichtiger Bestandteil unserer Arbeit ist.

i. Vorbereitungen

In den Folgenden Absätzen wird etwas zur Stabilität, zum Objekt, zum Hintergrund und zur Aufstellung des Objektes erzählt.

Bei der Aufnahme von Hologrammen ist die zeitliche und räumliche Stabilität vorausgesetzt, denn das Objekt und die Aufnahmeapparatur dürfen sich bei der manchmal minutenlang andauernden Belichtungszeit nicht bewegen. Schon die kleinste Erschütterung in der Größe einer Wellenlänge wäre zu viel. Die Stabilität ist daher so wichtig, weil schon bei der kleinsten Erschütterung die Lichtwellen anders verlaufen und sich so das Interferenzmuster verändert oder nicht entsteht.

Daher wäre es sinnvoll den Hologrammaufbau räumlich zu fixieren. Des Öfteren werden dafür schwingungsfreie Tische benutzt, jedoch wäre dies für uns ein zu hoher Kostenaufwand. Deswegen versuchen wir uns mit anderen Mitteln einen mehr oder weniger schwingungsfreien Tisch / Platte zu bauen.

Nun zum Aufnahmeobjekt, zum Hintergrund und zur Befestigung des Objektes. Das Objekt sollte möglichst aus hartem Kunststoff, Metall oder Holz bestehen, da weiche Materialien wie zum Beispiel Papier nicht starr genug sind. Desweiteren sollte der Hintergrund des Objektes schwarz sein, damit das Objekt besser wirkt. Zur Befestigung könnten Schrauben oder Kleber dienen.

(1) Befestigung des Films

Unser Film liegt in einer Minolta X-300 Kamera, dessen Objektiv abgeschraubt ist, damit das Laserlicht ohne weitere Linsen direkt auf den Film trifft. Für diese Kamera besitzen wir einen Drahtauslöser, der Erschütterungen verhindert.

(2) Herstellung von Bleichflüssigkeit

Für die Bleichflüssigkeit benötigt man 5g Kaliumdichromat ($K_2Cr_2O_7$) und 5ml konzentrierte Schwefelsäure, die man in 1 Liter destillierten bzw. demineralisiertem Wasser löst.

Den Entwickler haben wir passend zum Film von einem Fotografen bekommen.

ii. Die Aufnahme des Hologramms

Die physikalischen Vorgänge der Aufnahme können folgendermaßen beschrieben werden.

Bei der Holographie werden das Interferenzbild aus Objekt- und Referenzstrahl auf dem Film gespeichert. Um ein kontrastreiches und scharfes Interferenzbild zu erzeugen benötigt man eine kohärente Lichtquelle und einige Streulinsen um diese aufzuweiten. Dann lässt man diese Wellenfront auf ein Objekt treffen, dort wird das Licht weiter gebeugt und gestreut. Es entsteht ein Wellenfeld.

Auf dem Film überlagern sich diese Objektwelle und die sogenannte, direkt von demselben Laser kommende, Referenzwelle, d.h. sie interferieren miteinander. Filme, die für Holographie genutzt werden, sind jedoch die gleichen wie bei der Fotografie. Auch sie zeichnen nur Intensitäten auf. Doch wird die Intensität bei der Holographie nicht allein durch die eintreffenden Lichtstrahlen bestimmt, sondern durch die Differenz der Intensität durch konstruktive und destruktive Interferenz und durch die relative Phase von Objekt- und Referenzwelle bestimmt.

Wird dieser Film nun entwickelt, erhält man an den belichteten Stellen Schwärzungen. Dies sind sehr feine Strukturen, die das menschliche Auge nicht mehr erfassen kann, für ein Hologramm benötigt man deshalb eine Auflösung von bis zu 6000 Linien auf einem Millimeter. Daher benötigt man extrem hochauflösende Filme, die es heutzutage nur noch relativ selten gibt.

Die Verteilung der Schwärzungen wird durch die Wellenfunktion (Psi-Funktion) beschrieben. Die Wellenfunktion $\Psi(\vec{x}, t)$ eines Teilchens beschreibt eine Ausbreitung in Raum und Zeit. Das Quadrat der Wellenfunktion am Ort des Films gibt die Wahrscheinlichkeit an, ein Elektron auf dem Film anzutreffen. Daher kann man sagen, dass das Interferenzbild ein Wahrscheinlichkeitsbild ist. An den Stellen wo ein Elektron in der Filmbeschichtung von einem Photon des Lichtes getroffen wird, ist der Film schwarz, da Energie übertragen wurde. An den Stellen, wo kein Elektron von einem Photon getroffen wird, bleibt der Film durchsichtig.

e. Wiedergabe

Um die Wiedergabe eines Hologramms zu verstehen muss man sich zweier Sachen klar sein. Die erste ist, dass ein Hologramm aus mehr oder weniger engen durchsichtigen oder undurchsichtigen Linien besteht. Der zweite, weitaus schwierigere Schritt besteht darin, zu verstehen, wie sich das Licht bei Belichtung des Hologramms verhält. Dafür bedient man sich sehr oft dem Beispiel der Wellen im Wasser. Wirft man einen kleinen Stein in eine ruhige Wasseroberfläche, so entstehen um die Eintrittsstelle konzentrische Wellenkreise. Treffen diese Kreise nun auf eine Platte mit einer sehr engen Öffnung, gehen von der anderen Seite des Spaltes wiederum Kreiswellen aus. Die Wellen werden nicht etwa von dem Spalt verringert oder ausgeblendet, es entstehen neue Kreise. Genauso stellt man es sich auch bei Licht vor. Es verteilt sich hinter dem Spalt wieder in alle Richtungen.

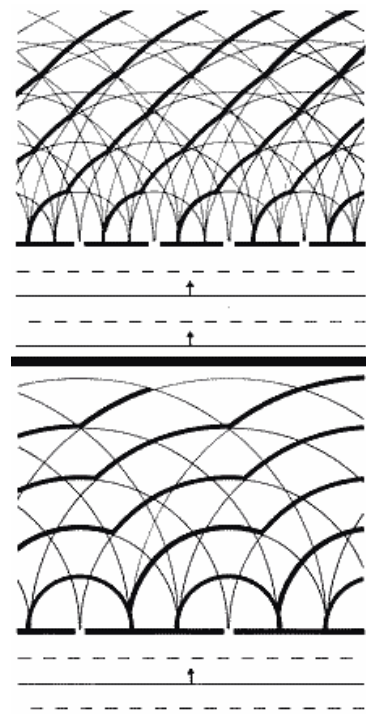


Abb. 8: Ausbreitung von Licht an einem Spalt [4]

Verbindet man nun diese Ringe (siehe Abb. 8) erhält man eine steil verlaufende Wellenfront. Je enger die Spalte zusammen liegen desto steiler ist die Front. Dies ist der entscheidende Gedanke! Wenn von dem Objektstrahl sehr flache Wellen kommen, sind die Öffnungen sehr weit auseinander. Und bei der Wiedergabe bedeuten weit entfernte Öffnungen eine flache Wellenfront. Also erhält man exakt die gleiche Wellenstruktur, nur durch Belichtung der Öffnungen in verschiedenen Abständen. Daher ist das Hologramm keine optische Täuschung. Es ist dieselbe Wellenfront, wie sie von dem abgebildeten Objekt ausgehen würde. Daher benötigt der Mensch ein vom Auge unabhängigen Sinn um sich zu vergewissern, dass dieses Objekt nicht existiert. Hologramme werden manchmal zu Recht als Fenster bezeichnet. Aus manchen Blickwinkeln kann man den Hintergrund nicht sehen, nämlich da, wo dieser durch den Vordergrund verdeckt wurde. Aus anderen Winkeln jedoch sieht man diese Stelle des Hintergrunds.

Der einzige Unterschied zwischen Hologramm und Fenster ist, dass die Bildinformationen direkt durch das Fenster hindurch kommen, beim Hologramm werden sie erst „gespeichert“ und können dann betrachtet werden.

Jedoch ist die ganze Situation nicht ganz so einfach. Es entsteht neben dem Abbild der Gegenstandswelle noch eine verfälschte Lichtwelle. Dies ist auch an der Abbildung zu erklären. Um den Objektstrahl zu rekonstruieren wird immer ein Ring mit dem nächst größeren verbunden. Andersrum passiert es aber genauso. Es kommt zu einer Welle, bei der sich immer die nächst kleineren Wellen verbinden. So werden Ausbuchtungen am Objekt zu Einbuchtungen an dieser fehlerhaften Welle. Diese falschen Bilder nennt man „pseudoskopische Bilder“. Sie kann man auch sichtbar machen, indem man das Hologramm von der „falschen“ Seite beleuchtet. Dann sieht man einen Abdruck des eigentlichen, auf dem Hologramm abgebildeten Objekts.

5. Wechselwirkung von Photonen und Materie

Wenn man die Wechselwirkung von Photonen und Materie beschreibt, geht man von einer Teilchenvorstellung von Photonen aus, nicht von einer Wellenvorstellung, da die Wellenvorstellung nur die Ausbreitung des Lichtes beschreibt. Entweder gibt das Licht die ganze Energie ab, oder keine.

Bei der Teilchenvorstellung geht man davon aus, dass das Licht aus einzelnen Quanten besteht, die Energie transportieren. Photonen werden deshalb den Quantenobjekten zugeordnet.

Der Energieaustausch von Licht und Materie, in unserem Fall dem Film, erfolgt durch Photonen. Wenn ein Photon auf unseren Film auftrifft wird die Energie $E_{ph} = hf$ auf ein Elektron übertragen. Die Energie des Lichtes wird also nur in festen Beträgen übertragen. Je höher die Intensität des Lichtes ist, desto mehr Elektronen werden angeregt.

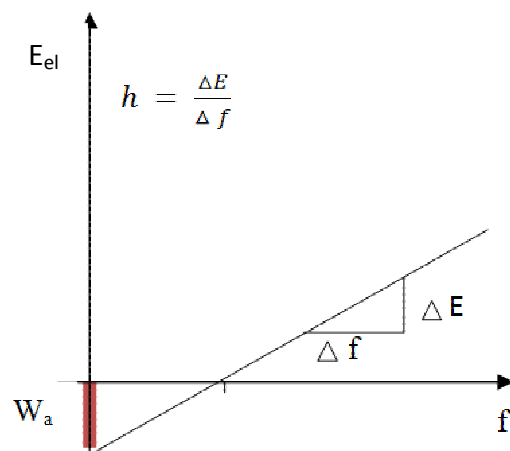


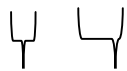
Abb. 9: f - E -Diagramm zur Auslösung von Elektronen

$E_{ph} = hf$ beschreibt die Energie eines Teilchens. h ist die Planck'sche Konstante $h = 6,636 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ und f ist die Frequenz. Nur wenn der Betrag $E = hf$ größer ist als die benötigte Anregungsenergie, findet ein Wechselwirkungsprozess statt.

Abbildung 9 zeigt, wie viel Energie, welche Arbeit und welche Frequenz von Nöten ist, um z.B. ein Elektron aus einer Oberfläche auszulösen (äußerer fotoelektrischer Effekt). Dabei ist W_G eine für jeden Stoff spezifische Konstante, die angibt, ab welcher Energie Elektronen ausgelöst werden können.

Außerdem erkennt man an der Skizze wie E und f auf h wirken.

$$E_{el} = h \cdot f - W_G$$



Teilchen Licht

6. Computergenerierte Hologramme

a. Was ist ein computergeneriertes Hologramm?

Ein computergeneriertes Hologramm (CGH) ist ein Hologramm, das nicht fotografisch aufgenommen, sondern im Computer errechnet wird. Dabei wird für jeden „angestrahlten“ Punkt des Objektes eine sogenannte Fresnelsche Zonenplatte berechnet, die dann überlagert werden. Die Fresnelsche Zonenplatte (auch: Fresnellinse) hatte lange Zeit keine Bedeutung, bis die Holographie im Jahr 1948 erfunden wurde. Diese Anordnung von konzentrischen Kreisen entspricht nämlich dem Hologramm eines einzelnen Objektpunktes. Der Zusammenhang zur Holographie wird klarer, wenn man den Begriff der Fresnellinse nutzt. Diese hat nämlich einen reellen und einen virtuellen Brennpunkt. Der reelle ist bei der Aufnahme des Hologramms das echte Objekt, der virtuelle ist das Hologramm, das bei der Wiedergabe abgebildet wird.

Also entstehen viele dieser konzentrischen Kreisbilder, die überlagert werden. Diese Interferenzbilder werden dann auf die Fertigungsmaschine übertragen, zumeist werden Stempel solcher Hologramme gemacht, in unserem Fall ein Ausdruck, der durch Abfotografieren auf den Film (das Hologramm) übertragen wird. Dann kann dieses erstellte Hologramm durch Belichtung mit einem aufgeweiteten Laser betrachtet werden.

Dabei muss beachtet werden, dass die Berechnung mit passender Wellenlänge zu dem später genutzten Laser geschieht (Unser Laser: 532nm (grünes Licht)).

CGHs haben den Vorteil, dass sie viel exakter sind, da Belichtungs- und Abbildungsfehler vermieden werden, weil die optische Aufnahme durch die Berechnung ersetzt wird. So kann es nicht zu unerwünschten Nebeneffekten kommen wie Doppelbilder, Intensitätsverlust und Verwacklung bei der Aufnahme, etc.

Aber auch sie haben Nachteile, denn man kann nicht einen ganzen (großen) Gegenstand komplett in Fresnellinsen umrechnen. Dies würde einen immensen Rechenaufwand bedeuten! Daher nutzt man eine Rasterung. Ein Würfel ist nun nichtmehr ein Würfel, sondern wird in kleine Punkte aufgerastert, die nicht weiter auseinander liegen als eine



Wellenlänge und eine minimale Größe haben. So fällt bei der Wiedergabe nicht auf, dass das Hologramm Lücken aufweist, da es erstens dem Laserlicht „nicht auffällt“, ob nun der komplette Gegenstand abgebildet ist oder der Gegenstand in einem sehr feinen Raster ist und zweitens ist das menschliche Auge nicht annähernd in der Lage, solche feinen Strukturen wahrzunehmen. Auch Schriften werden zumeist in Raster aufgeteilt, wie man auf dem Bild sehen kann. Dadurch wird es natürlich etwas ungenauer, jedoch spart es erhebliche Rechenleistung.

Trotz dem großen, rechnerischen Aufwand sind CGHs noch immer viel einfacher in der Herstellung, denn der Computer übernimmt die aufwendige, optische Arbeit. Deshalb kann man Hologramme heute wesentlich einfacher herstellen als früher.

Dies kann viele Anwendungen mit Hologrammen ermöglichen, wie z.B. die Holographischen Datenspeicher (HVD, Holographic Versatile Disc), da die beste Eigenschaft von Interferenzbildern ausgenutzt wird, nämlich dass die kompletten Informationen des Bildes in jedem einzelnen Bildpunkt sind. So braucht auch viel Speicher nur einen minimalen Platz auf der HVD. Die Entwickler (Optware, Fuji-Foto, CMD-Magnetics) geben an, auf einer Disc mit 12cm Durchmesser bis zu 3,9 TB Daten unterzubringen. Eine Datum für die serielle Herstellung ist noch nicht bekannt gegeben worden.

b. Erstellung eines CGH mit unserem Programm

i. Die Rechnung für das Interferenzbild

Die Erstellung eines solchen Hologramms beruht auf den Formeln einfacher Physik, ist jedoch rechnerisch sehr aufwendig.

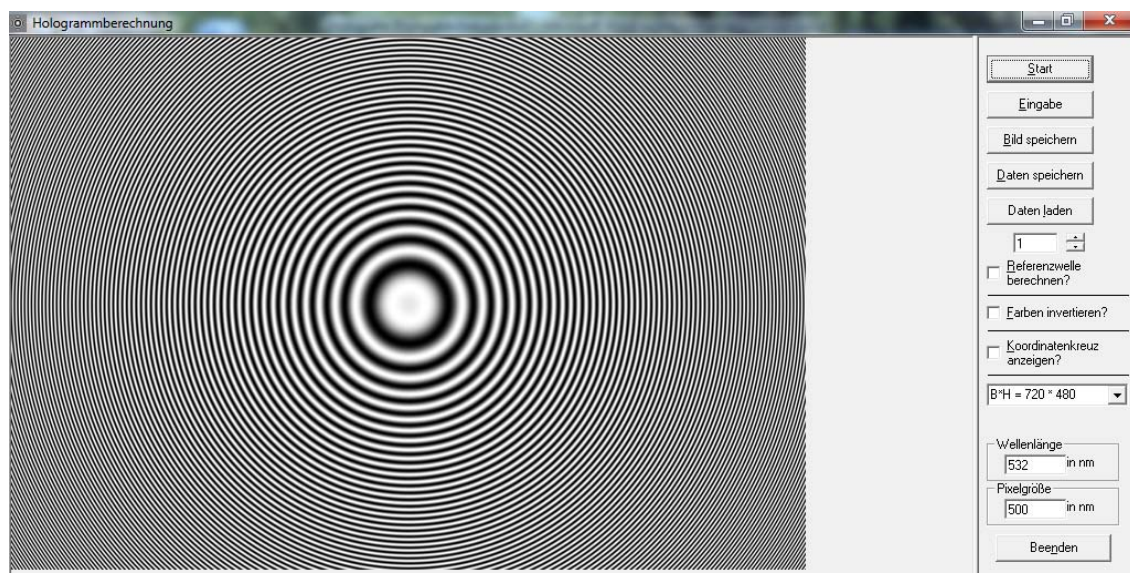


Abb. 10: Screenshot des von uns erstellten Programms

Unser selbstgeschriebenes Programm zur Erstellung von Interferenzbildern arbeitet auf der Basis von Visual Basic. Hier ein Auszug der Berechnung:

```

For X = -(Breite.Text / 2) To (Breite.Text / 2)
  Prozent = ((X + (Breite / 2)) / Breite) * 100
  Fresnelplatte.Caption = "Hologrammberechnung" + " - " + CStr(Prozent) + " %"

  SumPhase = 0
  If CheRe = 1 Then
    a = X * pg                                'Referenzwelle berechnen
    cre = a * Sin(Data.Alpha.Text * (Pi / 180))
    phasere = Data.I.Text * Sin(((cre / wl) - Int(cre / wl)) * 2 * Pi)
  Else
    phasere = 0
  End If

  For Y = -(Höhe.Text / 2) To (Höhe.Text / 2)
    SumPhase = phasere

    For nloop = 1 To n
      With Punkt(nloop)                       'Phase jedes Punktes an jeder Stelle des Bildes berechnen
        .c = Sqr((.X - X * pg) * (.X - X * pg) + (.Y - Y * pg) * (.Y - Y * pg) + .Z * .Z)
        .phase = (.c / wl - Int(.c / wl)) * 2 * Pi
        SumPhase = SumPhase + Sin(Data.Int(n - 1).Text * .phase)
      End With
    Next nloop

    Graustufe = ((SumPhase) / (n + CheRe.Value)) * ((SumPhase) / (n + CheRe.Value)) * 256
    Picture1.PSet (X + (Breite / 2), -Y + (Höhe / 2)), RGB(Graustufe, Graustufe, Graustufe)

  Next Y
Next X

```

X und Y stehen für die Punkte auf der Schirmebene. Sie können vorher definiert werden. Nun rechnet das Programm für jeden X-Wert die Graustufe des Referenzstrahls aus, falls dies gewünscht ist. Dieser ist immer in senkrechten Linien, da das Licht kohärent ist. Der Wert wird als SumPhase definiert. SumPhase steht für die Summe der Phasen aller Objektpunkte und des Referenzstrahls. Diese Zahl wird später ins 256-Farben-System übertragen.

Als nächstes wird für jeden Y-Wert des X-Wertes die Phase des Objektstrahls für jeden Objektpunkt berechnet. Dies geschieht, indem der Abstand des Punktes zu dem Schirmpunkt errechnet wird und durch die Wellenlänge dividiert wird. Dann wird dieser Wert als Ganzzahl (Integer) bestimmt und von dem ersten Wert abgezogen, damit ein Rest überbleibt. Diese Zahl ist ein Bruchteil der Wellenlänge. Dies wird mit $2 \cdot \pi$ multipliziert um die Phase zu bestimmen. Diese wird nun auch zu SumPhase hinzu addiert. Nloop steht für die Anzahl der zu berechnenden Objektpunkte, bei unserem Programm kann man derzeit maximal 10 Objektpunkte definieren. Sie werden in der Programmschleife nacheinander abgearbeitet. Nun haben wir einen letztendlichen Wert für SumPhase und müssen die Graustufe bestimmen. Dafür teilen wir die SumPhase durch die Anzahl der Objektpunkte (N) und quadrieren dies. Anschließend wird dies mit 256 multipliziert um den Farbumfang vollständig auszunutzen. Als letztes wird dieser Punkt in das Bild eingefügt und die ganze Rechnung geht für den nächsten Schirmpunkt von vorne los. Die Größe des zu berechnenden Bildes kann natürlich auch variiert werden.

ii. Vom Bild zum Hologramm

Als erstes muss man sich überlegen, wie hoch die Auflösung des Interferenzbildes sein muss. Der Abstand von zwei Pixeln muss nicht kleiner sein als die Wellenlänge des Lichtes, mit dem das Hologramm beleuchtet werden soll, also 532nm. Dies ist der Fall, weil wenn man zwei beleuchtete Punkte hat, die den Abstand einer Wellenlänge voneinander haben. Ein Grenzwert entsteht, bei dem das sogenannte erste Interferenzmaximum im rechten Winkel zu der Verbindungsgraden der Punkte steht, also würde es nicht mehr auf dem Schirm (Film) erfasst, da es parallel zum Schirm wäre. Sind zwei Punkte noch dichter zusammen, geschieht gar nichts. Ein Interferenzmaximum ist der Wert, bei dem die Schwärzung des Film maximal ist. Ist der Weglängenunterschied ΔD von den Punkten zum Schirm $\Delta D = n * \lambda$, also ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge, erhält man ein Interferenzmaximum.

Dadurch, dass wir unser berechnetes Interferenzbild ausdrucken um es abzufotografieren, benötigen wir einige Informationen über den Drucker und den Film. Der benutzte Drucker hat eine Auflösung von ca. 600 dpi, was einen minimalen Linienabstand von 0,01mm bedeutet. Der Film hat eine Körnung von 2 μ m, also einen minimalen Linienabstand von 4 μ m. Also benötigt man eine Verkleinerung mit einem Faktor von 25. Damit entsprechen 250 mm auf dem ausgedruckten Bild ca. 10 mm auf dem Hologramm. 25 mm entsprechen bei einer Druckerauflösung von 600 dpi ca. 5000 Pixeln, also wird das erste Prob hologramm mit einer Pixelzahl von $5000 \cdot 3000$ gerechnet. Beim Druck fällt auf, dass die Druckauflösung von 600 dpi nicht ausreicht. Die Graustufen werden in schwarz-weißen Rastern gedruckt. Diese Raster würden der Korngröße des Films entsprechen.

7. Weiteres Vorgehen

Unsere nächsten Schritte werden sein, dass wir ein fotografisches Transmissionshologramm mit Hilfe unseres Aufbaus selber erstellen und entwickeln. Zeitgleich werden wir eins der berechneten Bilder abfotografieren, entwickeln und versuchen wiederzugeben.

Wir werden versuchen, als Objekt beim optischen Aufbau einen Stecknadelkopf abzulichten, um zu überprüfen, oder dieser, weil es ein Punkt ist, als Interferenzbild eine Fresnelsche Zonenplatte hat. Dies können wir mit unserem errechneten Bild vergleichen.

8. Danksagung

Zu allererst bedanken wir uns natürlich sehr herzlich bei Thomas Biedermann, unserem JugendForscht-Betreuer, der uns immer mit Rat und Tat zur Seite steht und sich auch von einem Telefonanruf am frühen Morgen nicht stören lässt. Des Weiteren bedanken wir uns bei Sanni, dass sie immer um unser leibliches Wohl besorgt ist und uns ihren Mann für lange Zeit "ausborgt". Auch danken wir der gesamten JuFo-Truppe und den vielen Leuten, denen wir unsere Forschungen, oft auch mehrfach, erklärt haben. Ein weiteres Dankeschön geht an Henrikes Familie, die sie immer den weiten Weg gefahren haben und dabei Malte mitnahmen und es so uns ermöglicht haben, dieses Projekt durchzuführen. Noch ein Dank geht an Maltes Eltern, die ihn auch immer bei langen, abendlichen Gesprächen unterstützten.

9. Quellen

Bildquellen:

- [1] <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:HoloMouse.jpg&filetimestamp=20080306144111>
- [2] <http://dr13.de/fileadmin/media/dr13/farbe/lichtspektrum.png>
- [3] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/5/54/Interferenz_sinus.png
- [4] <http://www.holographie-online.de/wissen/grundlagen/hologrammwiedergabe/rekonstruktion1und2.gif>

Textquellen:

- [5] <http://www.pi.physik.uni-frankfurt.de/veranstaltungen/physik2pdfs/kapitel15.pdf>
 - [6] <http://www.licht.de/de/licht-know-how/ueber-licht/was-ist-licht/>
 - [7] <http://www.holographie-online.de/wissen/grundlagen/laser/laser.html>
 - [8] <http://www.licht.de/de/licht-know-how/ueber-licht/was-ist-licht/wellenlaenge-und-strahlung/>
 - [9] <http://www.pi.physik.uni-frankfurt.de/veranstaltungen/physik2pdfs/kapitel15.pdf>
- (Letzter Abruf aller Internetquellen: 13.1.2011)*

Literaturverzeichnis:

- [10] Heiß, Peter: "Die neue Holographie-Fibel", Wittig Fachbuch, Hückelhoven, 1995
- [11] Meyer, Prof. Dr. habil. Lothar: "Duden Basiswissen Schule Physik", Dudenverlag, Mannheim, 2007
- [12] Bergmann, Dipl.-Ing. Martin: "Schülerduden Physik", Dudenverlag, Mannheim, 2001
- [13] Metzler: "Physik", Hannover, 1998