

Wissenschaftliche Hausarbeit

im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das
Lehramt an Gymnasien im Fach Physik,
eingereicht dem Amt für Lehrerbildung

– Prüfungsstelle Gießen –

Thema:

Binäre Holographie für die Schule

Verfasser:

Stefan Richtberg
Frankfurter Straße 101
35392 Gießen

Gutachter:

Prof. Dr. Peter J. Klar

Inhalt

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Struktur	3
2. Theoretische Grundlagen der Holographie	5
2.1. Was ist binäre Holographie?	5
2.2. Wellennatur des Lichtes	5
2.3. Kohärenz	7
2.4. Interferenz	8
2.5. Beugung	9
2.6. Die Fraunhofersche Beugungstheorie	11
2.6.1. Interferenzmuster beim Einfachspalt	12
2.6.2. Interferenzmuster am Doppelspalt	13
2.6.3. Interferenzmuster am Gitter	15
2.6.4. Interferenz an dünnen Schichten	15
2.6.5. Bragg-Interferenz	15
2.7. Prinzip der Holographie	16
2.7.1. in-line-Aufbau und Fresnel-Hologramme	16
2.7.2. Computergenerierte Fresnel-Hologramme	18
2.8. Hologrammarten	19
2.8.1. Transmissions- vs. Reflexionshologramme	19
2.8.2. Amplituden- vs. Phasenhologramme	20
2.8.3. Volumen- vs. Flächenhologramm	21
2.8.4. in-line vs. off-axis Hologramme	21
2.8.5. Fresnel- vs. Fourier-Hologramme	22
2.9. CGH-Kodierungen	23
2.9.1. Direkte und indirekte Wellenfrontwiedergabe	23

2.9.2.	Optische Kodierung	24
2.9.3.	Lohmann-Kodierung	25
3.	Holographie in der Schule	27
3.1.	Anforderungen der klassischen Holographie	27
3.2.	Gründe für die Holographie	27
3.3.	Vorbereitende Pflichtthemen aus dem Lehrplan	28
3.3.1.	Einführungen in die Beugung	28
3.3.2.	Einführungen in die Welleninterferenz.....	29
3.4.	Anfangsvoraussetzungen auf Schülerseite	29
3.4.1.	Vorkenntnisse über Holographie	29
3.4.2.	Mögliche Fehlvorstellungen	30
3.4.3.	Motivationsmöglichkeiten	33
3.5.	Mögliche Unterrichtseinstiege in die Holographie	34
3.6.	Übergang zur CGHs	37
3.7.	Die Herstellung binärer Hologramme mittels des CGH Construction Kit	37
3.8.	Rekonstruktionsaufbauten	40
4.	Chancen und Probleme	41
4.1.	Erkenntnismöglichkeiten bei der Arbeit mit binären CGHs	41
4.2.	Probleme von CGHs aus dem Construction Kit	41
4.3.	Weitere Vertiefung	41
4.4.	Alternativen	41
4.5.	Fächerübergreifende Inhalte und Möglichkeiten	41
4.6.	Sicherheitsvorschriften beim Umgang mit Lasern	41
5.	Ausblick	41
6.	Fazit	41

1. Einleitung

1.1. Motivation

Man trägt sie fast immer mit sich durch die Welt, ob im Geldbeutel auf Banknoten, Kreditkarten oder dem Personalausweis, ob in der Plastiktüte mit dem neuen Einkauf aus dem Elektronikmarkt oder eingenäht in hochwertigen Kleidungsstücken. Hologramme finden sich an vielen Stellen im Alltag. Sie dienen als Siegel, Echtheitszertifikat oder Sicherheitsmerkmal, haben oft eine silbern glänzende Oberfläche mit einem Schriftzug und schimmern im Licht je nach Blickwinkel in verschiedenen Farben.

Doch wie Hologramme hergestellt werden, welche Parameter ihr Aussehen beeinflussen und auf welchen physikalischen Gesetzmäßigkeiten sie beruhen, weiß heutzutage kaum jemand. Auch viele Abiturientinnen und Abiturienten sind mit dieser Thematik nicht in Berührung gekommen und selbst der Besuch des Physik-Leistungskurses führt an einem hessischen Gymnasium nicht automatisch dazu, dass das Thema im Unterricht zumindest kurz erörtert wird. Zwar findet sich das Thema Holographie im Lehrplan für die gymnasiale Oberstufe als fakultativer Unterrichtsinhalt, aber in der Fachdidaktik spielt dieses spezielle Thema aktuell anscheinend nur eine untergeordnete Rolle.

Dabei wurden bereits Anfangs der 80er Jahre erste Einsatzmöglichkeiten der Holographie im Unterricht aufgezeigt. So lieferte Gente 1980 eine genaue Anleitung zur Herstellung von Hologrammen mit einfachen fotografischen Mitteln, die sich alle durchaus auch in der Schulsammlung finden lassen (Gente, 1980). Heiß gab mit seinem Beitrag „Anregungen zu einer Unterrichtsreihe über Holographie“ (Heiß, 1982) weitere Impulse für die Implementierung der Thematik in den Oberstufenunterricht. Auch in der Lehreraus- und Weiterbildung wurde das Interferenzphänomen zum Thema. So erschienen in der Reihe Kontaktstudium Physiklehrerfortbildung zwei Hefte mit Einführungen in die Holographie

(Koppelman, et al., 1983a) (Koppelman, et al., 1983b). Diese lieferten den Lehrerinnen und Lehrern, neben einer fachlich-thematischen Klärung und dem Vorschlag für diverse Einföhrungsexperimente, auch ganz konkrete Unterrichtsmaterialien. So waren den Fortbildungsheften optische Gitter, Hologrammvorlagen zur photographischen Verkleinerung, Transmissionshologramme und ein Weißlichthologramm beigelegt. In der Folgezeit wurden in den Fachzeitschriften weitere Aufsätze über Holographie publiziert und 1986 erschien in der Reihe „Praxis der Naturwissenschaften“ ein ganzes Themenheft „Holographie“ (1986).

Ab 1990 wurden erste rechnerorientierte Algorithmen zur Berechnung von Hologrammen mit Hilfe des PCs veröffentlicht (Scheller, 1990) und sehr bald waren auch Programme bzw. Programmcodes zur Hologrammberechnung einfacher Mehrpunktobjekte verfügbar (Schwarze, et al., 1992). Allerdings nahm in der Folgezeit die Zahl der Veröffentlichung in den Fachzeitschriften zum Thema Holographie ab und einzig in Tagungsbänden des Fachverbandes Didaktik der Physik von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft spielten Unterrichtsentwürfe hierzu noch eine Rolle (Horn, et al., 2003). Aktuell ist die Entwicklung von Unterrichtseinheiten zu diesem Phänomen allen Anscheins nach vollständig zum Erliegen gekommen und das obwohl sich die Hologramme selbst in ihren unterschiedlichsten Formen im Alltag immer weiter verbreiten.

Dieser Widerspruch ist der grundlegende Anstoß für die folgende Arbeit. Weiterhin hat aber auch die immer schneller fortschreitende technische Entwicklung der letzten 15 Jahre eine Rolle gespielt, welche für den Schulunterricht neu Chancen bietet und den Zeitaufwand für eine Unterrichtsreihe über Holographie gegebenenfalls erheblich reduzieren kann. Ebenso spielt natürlich die noch immer bestehende Verankerung des Themas im Lehrplan für die gymnasiale Oberstufe eine Rolle. Trotz der aktuellen Schulreform mit der Einführung des achtjährigen Gymnasiums und den damit verbundenen Überarbeitungen der Lehrpläne, findet sich die Holographie weiterhin explizit im Physiklehrplan des Landes Hessen (Hessisches

Kultusministerium, 2010). Auch in den entsprechenden Dokumenten aus Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, 2002), Rheinland-Pfalz (Ministeriums für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz) und Bremen (Freie Hansestadt Bremen, 2008) wird die Holographie ausdrücklich als Thema für den Unterricht vorgeschlagen. In den restlichen Bundesländern ist zumindest die Interferenz von elektromagnetischen Wellen Nicht zuletzt trug auch die Möglichkeit einer künstlerischen Nutzung der Holographie zur Entstehung dieser Arbeit bei, auch wenn dieser Bereich in der folgenden Arbeit nur sehr am Rande eine Rolle spielen wird.

1.2. Struktur

Die folgende Arbeit ist der Versuch einen Weg aufzuzeigen, auf dem das Thema der Holographie wieder Eingang in den Schulunterricht finden kann. Dazu wird die Holographie so aufbereitet, dass sie mit heute in fast allen Schulen zur Verfügung stehenden Mitteln aktiv behandelt werden kann. Dabei wird speziell auf die Schülerzentrierung geachtet und es werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Schülerinnen und Schüler sich selbstständig mit Hilfe von Experimenten dem Themengebiet nähern bzw. eigenständige Erfahrungen sammeln können.

Dazu wird zunächst in Kapitel 2 die physikalische Basis für die Holographie, die Beugung und Interferenz von Wellen, an Anwendungsbeispielen erläutert und in einen mathematischen Rahmen gefasst. Anschließend werden verschiedene Hologrammtypen vorgestellt, charakterisiert und die Unterschiede zwischen ihnen herausgearbeitet. Dabei spielen vor allen Dingen mögliche reale Aufnahmekonstruktionen, das Verhalten des Hologramms bei der Rekonstruktion (Transmission oder Reflektion), und die beiden Grenzfälle des Kirchhoffschen Beugungsintegral, die Fresnel- und die Fraunhofer-Näherung, zentrale Rollen.

Im dritten Kapitel werden zunächst die strukturellen Anforderungen der klassischen Holographie an die Schule aufgezeigt. Anschließend wird die Ausgangssituation auf Schülerseite beleuchtet, was Bereiche wie Vorerfahrungen und Vorstellungen bzw. Fehlvorstellungen rund um die Holographie mit einschließt. Weiter wird der mögliche thematische Einstieg diskutiert, bevor dass die Berechnung und die Herstellung von binären Hologrammen mit Hilfe des Computerprogramms „CorticalCafe Computer Generated Hologram (CGH) Kit“ beschrieben wird. Hierauf folgen die Vorstellung möglicher Rekonstruktionsaufbauten sowie deren Unterschiede. Auch auf die Vor- und Nachteile der einzelnen Aufbauten wird kurz eingegangen. Ebenso werden hier konkrete Rekonstruktionsergebnisse von zuvor mit dem CGH Construction Kit hergestellten Transmissionshologrammen präsentiert.

In Kapitel 4 werden die Erkenntnismöglichkeiten für Schülerinnen und Schüler bei der schulischen Behandlung von Holographie in den Mittelpunkt gestellt. Dabei kommt auch zur Sprache welche positiven und negativen Effekte die didaktische Reduktion auf binäre Holographie haben kann. Auch mögliche Verknüpfungen mit anderen Unterrichtsfächern oder der Einsatz des Themas in besonderen Unterrichtsformen werden diskutiert bevor zum Abschluss der Fokus auf mögliche Probleme des Themas und der Behandlung im Unterricht gelegt wird.

In Kapitel 5 wird ein Ausblick auf mögliche weitere Entwicklungen im Bereich der Holographie für die Schule gegeben. Dabei werden sowohl technische Weiterentwicklungen wie auch die laufenden Veränderungen in der deutschen Schullandschaft einbezogen.

Am Ende der Arbeit steht ein Fazit in welchem die wichtigsten pro- und contra-Argumente der Behandlung von Holographie im Schulunterricht nochmals kurz dargestellt werden und versucht wird, eine mögliche Unterrichtssequenz unter Beachtung dieser Darlegungen zu skizzieren.

2. Theoretische Grundlagen der Holographie

2.1. Was ist binäre Holographie?

Das Wort Holographie stammt aus dem altgriechischen und setzt zu zusammen aus holos [ὅλος], was so viel heißt wie ganz oder vollständig, und gramma [γράμμα], was mit Geschriebenes übersetzt werden kann. Es bezeichnet eine Methode der vollständigen Speicherung und Wiedergabe der Informationen eines Wellenfeldes. Im Gegensatz zur bekannteren Photographie, die nur die Amplitude einer Welle, also die Lichtintensität, speichern kann, speichert die Holographie zusätzlich auch die Phase, die sich als Tiefeninformation ansehen lässt. Dazu nutzt die Holographie eine Reihe von physikalischen Prinzipien der Wellenoptik, wie z.B. Interferenz und Beugung, welche später noch ausführlicher thematisiert werden.

Hologramme lassen sich auf vielen unterschiedlichen Wegen herstellen, aber generell kann man sie in zwei Klassen einteilen. Zum einen in die klassisch optisch Aufgezeichneten, welche mit Hilfe von holographischem Filmplatten produziert werden, und zum anderen in mit dem Computer berechnete Hologramme, welche man als Computer Generated Holograms (CGHs) bezeichnet. Da besonders in der Anfangszeit der Computerholographie viele Ausgabemedien nur in der Lage waren zwei unterschiedliche Werte zu produzieren, also z.B. schwarz und weiß, hat sich der Teilbereich der sogenannten binären Holographie gebildet. Hologramme dieser Art besitzen also beispielsweise nur vollständig schwarze oder komplett weiße Bereiche, aber keine Graustufen dazwischen, wie sie etwas bei der Schwarz-Weiß-Photographie vorkommen.

2.2. Wellennatur des Lichtes

Die Holographie ist Phänomen, das auf der Wellennatur des Lichtes beruht. Diese wurde bereits im 17. Jahrhundert vom niederländischen Physiker Christiaan Huygens entdeckt und ist heute allgemein in Form des Huygensschen Prinzips bekannt. Es besagt, dass jeder Punkt einer bestehenden Wellenfront Ausgangspunkt für eine neue

kugelförmige Elementarwelle ist, die sich mit derselben Geschwindigkeit und Frequenz ausbreitet wie die ursprüngliche Wellenfront (Tipler, et al., 2006). In der geometrischen Optik hingegen nimmt man an, dass von einem Lichtquellpunkt gradlinige Strahlen in alle Richtungen ausgehen.

Die mathematische Beschreibung von Lichtwellen ergibt sich theoretisch aus den Maxwell'schen Gleichungen. Dabei wird die Lichtausbreitung durch sogenannte Wellenfunktionen beschrieben, die es ermöglichen die Amplitude der Lichtwelle an jedem Punkt des Raumes zu jedem gewünschten Zeitpunkt zu berechnen. Für eine ebene Wellen lässt sich diese schreiben als

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{A}_0 * \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} - \delta) \quad (2.1)$$

Wellenfunktion einer ebenen Welle

$\vec{E}(\vec{r}, t)$ gibt dabei den momentanen Wert der elektrischen Feldstärke zum Zeitpunkt t am Ort $\vec{r}$ an. $\vec{A}_0$ bezeichnet die maximale Amplitude der elektrischen Feldstärke, ω ist die Kreisfrequenz der zeitlich veränderten Feldstärke an einem festen Ort, $\vec{k}$ ist der Wellenvektor, welcher die Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle bestimmt und in den die Wellenlänge des Lichtes durch den Zusammenhang $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ einfließt. δ ist schließlich noch eine Phasenkonstante.

Gleichung (2.1) beschreibt also eine sich unendlich ausbreitende Welle. Eben wird sie genannt, da Punkte gleicher Feldstärke Ebenen bilden, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle stehen.

Die Wellenfunktion einer Kugelwelle, die für das Huygenssche Prinzip eine zentrale Bedeutung spielt, unterscheidet sich von der einer ebenen Welle nur durch den Amplitudenfaktor.

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{\vec{A}_0}{|\vec{r}|} * \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} - \delta) \quad (2.2)$$

Wellenfunktion einer Kugelwelle

Dabei ist $\vec{k}$ stets parallel zu $\vec{r}$ und so folgt, dass sich das Argument von $\cos$ nicht ändert, solange $|\vec{r}|$ konstant ist, man also einen festen Abstand vom Ursprung der Kugelwelle betrachtet. Die Flächen gleicher Feldstärke sind hier also Kugelflächen rund um den Wellenursprung, daher die Bezeichnung Kugelwelle.

2.3. Kohärenz

Für viele grundlegende physikalische Gesetzmäßigkeiten, welche sich die Holographie zu nutze macht, ist kohärentes Licht notwendig. Zwei Wellenzüge nennt man dabei kohärent, wenn ihre Phasendifferenz zeitlich konstant ist. Das Licht einer gewöhnlichen Lampe ist in der Regel nicht kohärent, da es aus den Emissionen von Millionen von unabhängigen Atomen besteht. So ändern sich hier die Phasendifferenzen ständig und sind alles andere als zeitlich konstant. Mit diesem Problem hatte auch der Begründer der Holographie, Dennis Gabor, im Jahr 1948 zu kämpfen. Er versuchte mit Hilfe einer Quecksilberdampflampe und diversen optischen Aufbauten kohärentes Licht zu erhalten, was ihm allerdings nur mäßig gelang. (Heiß, 1995) Dies führte insgesamt zu nur sehr unbefriedigenden Ergebnissen bei der Hologrammherstellung und -rekonstruktion.

Doch mit der Erfindung des Lasers Anfang der 60er Jahre stand plötzlich eine sehr kohärente Lichtquelle zur Verfügung, was der Holographie enorme Fortschritte ermöglichte.

Das Licht eines idealen, völlig monochromatischen Lasers kann man als unendlich lange Sinuswelle betrachten. Teilt man nun den Strahl, so besitzt man zwei vollständig kohärente Lichtwellen. In der Realität sind auch Laser nicht völlig monochromatisch, einfache Gasentladungsröhren schon gar nicht. Das Licht solcher Röhren besteht aus Wellenpaketen, welche nur eine begrenzte Anzahl von Wellenlängen besitzen, welche auch noch nahezu gleich lang sind. Die Länge eines solchen Paketes nennt man Kohärenzlänge und kann als Qualitätskriterium für die Eignung zur Holographieherstellung genutzt werden. Je länger die Kohärenzlänge desto fehlerfreier kann das Hologramm werden. Spezielle modenstabilisierte Laser erreichen heutzutage Kohärenzlängen von vielen Kilometern, während die entsprechenden Längen bei Gasentladungsröhren nur im Bereich von einigen Millimetern liegen.

2.4. Interferenz

Für die Holographie ist die sogenannte Interferenz von Wellen eine grundlegende Notwendigkeit. Zur Verdeutlichung der Gesetzmäßigkeiten reicht es an dieser Stelle die Zweistrahlinterferenz zu betrachten. Für eine ausführlichere mathematische Beschreibung sei auf entsprechende Literatur verwiesen, wie (Menzel, et al., 1973). Die Wellenfunktion einer Lichtwelle gibt die elektrische Feldstärke als Vektorgröße an. Befinden sich nun zwei unterschiedliche Wellen an einem Ort r , so überlagern sich ihre beiden Wellenfunktionen und es gilt das Prinzip der linearen Superposition. Dies bedeutet, dass sich die resultierende Feldstärke an einem Ort r aus der Vektorsumme der beiden Einzelfeldstärken ergibt. Somit ergeben sich an bestimmten Stellen Verstärkungseffekte, die Amplitude der resultierenden Welle ist also größer als die Amplitude einer einzelnen Welle, während sich an anderen Orten Auslöschungsphänomene zeigen. Aus zwei sich überlagernden Lichtwellen kann also auch unter bestimmten Umständen Dunkelheit entstehen. Mathematisch lässt sich die Interferenz von zwei ebenen Wellen $\vec{E}_1, \vec{E}_2$ wie folgt beschreiben:

Überführt man (2.1) in die komplexe Schreibweise, was das Rechnen mit den Wellenfunktionen deutlich erleichtert, so erhält man für die beiden Ausgangswellen

$$\begin{aligned}\vec{E}_1(\vec{r}, t) &= \vec{A}_1 * \exp [i(\omega_1 t - \vec{k}_1 \vec{r}_1 + \delta_1)] & \text{bzw.} \\ \vec{E}_2(\vec{r}, t) &= \vec{A}_2 * \exp [i(\omega_2 t - \vec{k}_2 \vec{r}_2 + \delta_2)]\end{aligned}$$

Allgemein gilt für die resultierende Welle $\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

Allerdings kann man die Amplitude der Welle nicht direkt beobachten, sondern man sieht nur die Intensität an einer bestimmten Stelle. Diese ergibt sich zu

$$I_{ges} = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)(\vec{E}_1^* + \vec{E}_2^*) \quad (2.3)$$

Intensität von zwei überlagerten ebenen Wellen

wobei $\vec{E}_1^*$ und $\vec{E}_2^*$ jeweils das komplex konjugierte der Wellenfunktion darstellt.

Löst man die Klammern von (2.3) auf, so erhält man

$$I_{ges} = \vec{E}_1 \vec{E}_1^* + \vec{E}_2 \vec{E}_2^* + \vec{E}_1 \vec{E}_2^* + \vec{E}_2 \vec{E}_1^* \quad (2.4)$$

$$\overbrace{\quad\quad\quad}^{\text{B}}$$

und sieht, dass die ersten beiden Summanden die Intensitäten der beiden einzelnen Wellen sind. Für die Interferenz spielen also nur die letzten beiden Terme eine Rolle. Stehen nun $\vec{E}_1, \vec{E}_2$ senkrecht aufeinander, so werden beide Summanden gleich null und es tritt keine Interferenz auf. Die Lichtintensität im Raum ist einfach die nur die Summe aus den beiden Einzelintensitäten.

Anders ist es, wenn $\vec{E}_1, \vec{E}_2$ parallel zueinander sind. Dann lassen sich die beiden Summanden durch Ausrechnen und Umformen schreiben als

$$B = A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t - (\vec{k}_1 \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \vec{r}_2) - (\delta_1 + \delta_2)) \quad (2.5)$$

Interferenzterm für zwei parallele, überlagerte Wellen

Der Interferenzterm B bleibt also auch bei paralleler Ausbreitungsrichtung zeitabhängig und entzieht sich somit der einfachen Beobachtung durch unser Auge. Einzig unter der Bedingung $\omega_1 = \omega_2$ ergibt sich ein stationäres Bild. Diese Forderung erfüllt gerade das bereits erwähnte, kohärente Licht eines Lasers.

Das heißt, dass stationäre Interferenz, also die gleichbleibende Verstärkung bzw. die Auslöschung von Lichtwellen an einem Ort, sich mit Hilfe der Überlagerung von kohärenten Laserstrahlen erreichen lässt.

2.5. Beugung

Neben der Interferenz spielt noch ein weiterer Effekt eine entscheidende Rolle für weite Bereiche der Holographie. Dieser beruht ebenfalls auf der Wellennatur des Lichtes und wird Beugung genannt. Unter dem Begriff versteht man Abweichungen von der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes, so wie sie die Strahltheorie bzw. die geometrische Optik annimmt. Beleuchtet man zum Beispiel eine scharfe Kante, realisierbar durch eine Rasierklinge, mit einer ebenen Welle, so müsste sich unter Anwendung der geometrischen Optik auf einem Schirm ein scharfer Intensitätsübergang von beleuchteter Fläche

zu vollkommenem Schatten finden lassen. Im Experiment ist findet sich aber ein stetiger Übergang (vgl. Abb. 1).

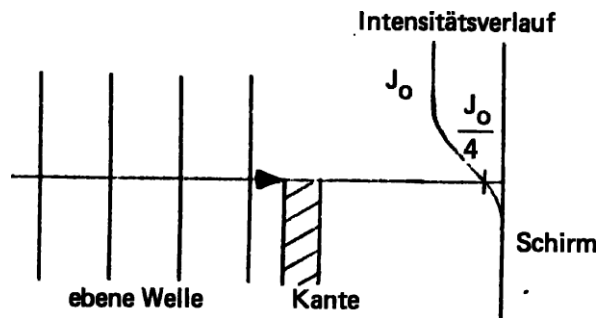


Abbildung 1: Lichtintensitätsverlauf bei bei Beuleuchtung einer scharfen Kante durch eine ebene Welle

Eine Erklärung hierfür liefert das bereits erwähnte Prinzip der Huygensschen Elementarwellen. Jeder Punkt der ebenen Wellenfront ist also wieder Ausgangspunkt für eine elementare Kugelwelle. Im Abstand b von der Wellenfront befindet sich ein Punkt P. In diesem Punkt soll nun die Feldstärke berechnet werden. Ein möglicher Weg dazu ist die Superposition aller Beiträge der Huygensschen Elementarwellen von der ebenen Wellenfront zu betrachten. Dies führt allerdings zu einem analytisch nicht lösbaren Integral, sodass die Berechnung nur näherungsweise möglich ist. Einen Vorschlag hierzu lieferte der französische Physiker Augustin Jean Fresnel. Er legte um den Punkt P Kugeln mit den Radien $r_1 = b + \frac{\lambda}{2}$; $r_2 = b + \lambda$ usw. (Abb. 2).

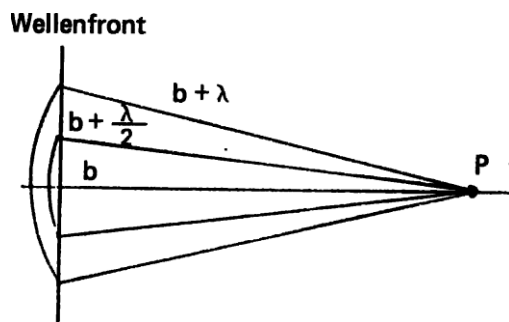


Abbildung 2: Prinzip der Fresnel'schen Zonenkonstruktion

Die Schnitte dieser Kugeln mit der ebenen Wellenfront teilen diese dann in Zonen auf. Und zwar gerade so, dass innerhalb einer Zone noch keine destruktive Interferenz zwischen den von ihr ausgehenden Elementarwellen auftritt, da ihre Phasendifferenz kleiner ist als $\pi/2$. Jede Zone liefert also einen gewissen Beitrag K_i zur Feldstärke im Punkt P. Die Gesamtfeldstärke ergibt sich nun aus der Superposition

aller Zonenbeiträge, also aller K_i . Allerdings sind aufeinanderfolgende K_i gerade um π phasenverschoben, sodass keine Summe sondern eine alternierende Reihe entsteht:

$$E(P) = K_1 - K_2 + K_3 - K_4 \dots \quad (2.6)$$

Alternierende Reihe zur Berechnung der elektrischen Feldstärke an einem Punkt P mittels der Fresnel'schen Zonenkonstruktion

Diese Reihe konvergiert und durch geschicktes umformen lässt sie sich zu $E(P) = \frac{K_1}{2}$ überführen.

Überträgt man nun diese Überlegungen auf die Beleuchtung einer scharfen Kante und legt somit den Punkt P genau auf die sich aus der geometrischen Optik ergebenden Licht-Schatten-Grenze, so halbiert die Kante alle Zonen. Damit wird auch der Beitrag jeder Zone zur elektrischen Feldstärke halbiert und nach (2.6) somit auch die Gesamtfeldstärke $E(P)$. Für die Intensität bedeutet dies, dass sie sich im Vergleich zur Beleuchtung ohne Kante auf ein Viertel reduziert. Wie erwähnt ist dieser Weg der Berechnung nur eine Näherung, die Fresnel-Näherung. Für eine exakte mathematische Lösung müsste das Kirchhoffsche Beugungsintegral für den entsprechenden Fall betrachtet werden. Allerdings ist dies nur für die wenigsten Fälle sinnvoll, da dies einen deutlichen mathematischen Mehraufwand bedeutet. Die Fresnel-Näherung ist eine Nahfeldnäherung des Beugungsintegrals. Das heißt sie kommt dann zur Anwendung, wenn das Beugungsmuster in der Nähe des Hindernisses beobachtet wird oder das Licht nicht senkrecht auf den Spalt o.ä. trifft. Daher beachtet diese Näherung, dass die Strahlen nicht parallel zum Schirm laufen. Der Vorteil der Näherung liegt vor allem in ihrer Anschaulichkeit durch die einfache Zoneneinteilung.

2.6. Die Fraunhofersche Beugungstheorie

Mathematisch etwas einfacher zu beschreiben ist die sogenannte Fraunhofer-Näherung des Kirchhoffschen Beugungsintegrals. Diese ist im Wesentlichen die Fourier-Transformierte der Objektfunktion und eine Fernfeldnäherung. Ihre Anwendung setzt dabei zwei Dinge voraus: Zum

einen muss das einfallende Licht parallel sein, also eine ebene Welle bilden, was zur Folge hat, dass die nach dem Huygensschen Prinzip emittierten Kugelwellen in Phase sind und gleiche Amplituden besitzen. Zum anderen muss das Bild an einem weit entfernten Schirm beobachtet werden. Dadurch kann angenommen werden, dass die von einer Punktquelle ausgehenden Strahlen ungefähr parallel auf den Schirm treffen.

Sind beide Bedingungen erfüllt, so lassen sich mit Hilfe der Näherung relativ einfach die Interferenzmuster von Spalt, Mehrfachspalt und Gitter beschreiben.

2.6.1. Interferenzmuster beim Einfachspalt

Der Einfachspalt mit der Spaltbreite a wird von einer Reihe Punktquellen repräsentiert, die Wellen gleicher Amplitude abstrahlen.

Wie Abbildung 3 zeigt, löschen sich unter dem Winkel θ gerade die Wellen gegenseitig aus, deren Quellen im Abstand von $a/2$ liegen, da diese einen Gangunterschied von $\lambda/2$ bzw. eine Phasendifferenz von π besitzen.

Damit folgt für die Orte vollständiger Auslöschung beim Einzelspalt die Bedingung

$$a \sin \theta_m = m\lambda \quad \text{mit } m=1,2,3\dots \quad (2.7)$$

Bedingung für Nullstellen der Intensität im Beugungsmuster des Einzelspaltes

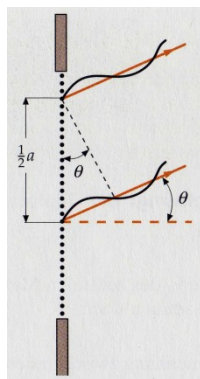


Abbildung 3:
Beugungsgeometrie
am Einzelspalt

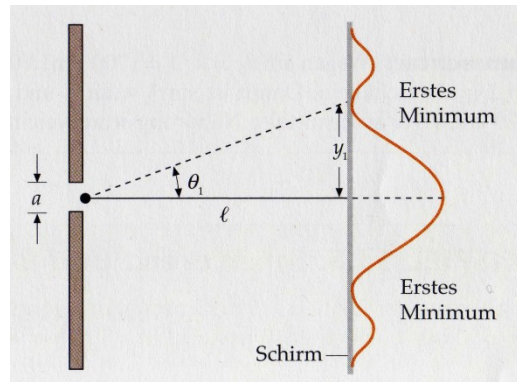


Abbildung 4: Geometrie zur Bestimmung des Abstandes y zwischen zentralem Beugungsmaximum und ersten Beugungsminimum

Durch die Fernfeldnäherung können wir davon ausgehen, dass nur kleine Beugungswinkel θ betrachtet werden. Somit ist $\theta \approx \tan \theta \approx \sin \theta$ und für den Abstand y_m des m -ten Beugungsminima vom zentralen Beugungsmaximum gilt

$$y_m = m\lambda \frac{l}{a} \quad \text{mit } m=1,2,3\ldots \quad (2.8)$$

Abstand des m -ten Beugungsminima vom zentralen Beugungsmaximum

Analog lässt sich die Bedingung für die n -ten Nebenmaxima aufstellen.

Diese ergibt sich zu

$$y_n = (2n - 1)\lambda \frac{l}{a} \quad \text{mit } n=2,3,4\ldots \quad (2.9)$$

Insgesamt ergibt sich bei der Beugung am Einzelspalt eine Intensitätsverteilung wie in Abbildung 5 dargestellt.

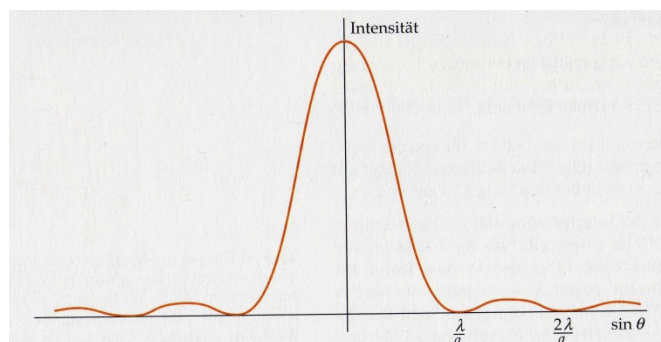


Abbildung 5: Intensitätsverteilung des Beugungsmusters am Einzelspalt

2.6.2. Interferenzmuster am Doppelspalt

Beim Doppelspalt können die beiden Spalte aus zwei kohärente Lichtquellen der Wellenlänge λ angesehen werden. Ist nun noch der Abstand l zwischen Schirm und Spalten groß gegenüber dem

Spaltabstand, so kann wieder von Fraunhofer-Beugung gesprochen werden und für den Gangunterschied $\Delta\lambda$ unter dem Winkel θ gilt, wie in Abbildung 6 dargestellt, $\Delta\lambda(\theta) = d \sin \theta$.

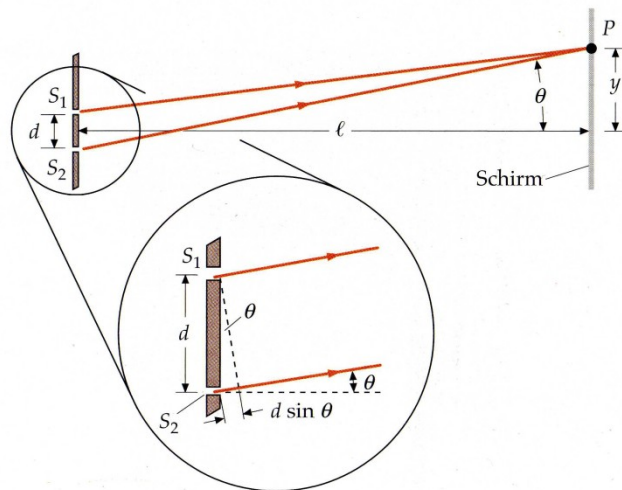


Abbildung 6: Geometrie der Interferenzmuster am Doppelspalt

Für ein Maximum konstruktiver Interferenz, also auch für ein Intensitätsmaximum, muss $\Delta\lambda$ ein ganzzahliges vielfaches der Wellenlänge λ sein. Es ergibt sich somit die allgemeine Bedingung für Interferenzmaxima:

$$d \sin \theta_m = m\lambda \quad \text{für } m=0,1,2,\dots \quad (2.10)$$

Bedingung für Fraunhofer-Interferenzmaxima am Doppelspalt

Vollständige Auslöschung tritt immer dann ein, wenn $\Delta\lambda = \lambda/2$ gilt, also eine Phasenverschiebung um 180° auftritt. Dies führt zu Bedingung für Minima:

$$d \sin \theta_m = (m - \frac{1}{2})\lambda \quad \text{für } m=1,2,3,\dots \quad (2.11)$$

Bedingung für Fraunhofer-Interferenzminima am Doppelspalt

Wie beim Einzelspalt lassen sich daraus auch die Abstände der Minima und Maxima von der Mitte des Schirms berechnen. Über die Winkelnäherung, die durch die Fraunhofer-Fernfeldbedingung anwendbar ist, folgt für den Abstand y_m des m -ten Maximas von der Schirmmitte

$$y_m = m\lambda \frac{\ell}{d} \quad \text{für } m=0,1,2,\dots \quad (2.12)$$

Abstand des m -ten Interferenzmaximas von der Schirmmitte

2.6.3. Interferenzmuster am Gitter

Die Überlegungen für die Interferenzmuster beim Doppelspalt lassen sich auch auf Gitter übertragen. Gitter besitzen eine hohe Anzahl äquidistanter Spalten und ihre zentrale Kenngröße ist die Gitterkonstante g , welche den Abstand zweier Spalte voneinander angibt. Ersetzt man in den Formeln (2.10) – (2.12) die Größe d durch die Gitterkonstante g , so erhält man die entsprechenden Formeln für Maxima, Minima und Abstände beim optischen Gitter. Anhand der Formeln ist zu erkennen, dass die Abstände zwischen den Interferenzmaxima bei kleiner werdendem Spaltabstand wachsen. Weiter nimmt die Breite der Maxima hierbei ab, sie werden schärfer und intensiver.

2.6.4. Interferenz an dünnen Schichten

2.6.5. Bragg-Interferenz

Einige Hologramme nutzen, insbesondere zur Farbänderung bei verschiedenen Betrachtungswinkeln, ein weiteres Interferenzphänomen, welches bei der Beleuchtung von Kristallstrukturen auftritt. Trifft kohärentes Licht unter einem Winkel α auf die Kristalloberfläche so wird ein Teil dieser Strahlung direkt an der ersten Gitterebene des Kristalls reflektiert, während ein anderer Teil weiter in den Kristall eindringt und z.B. an der zweiten

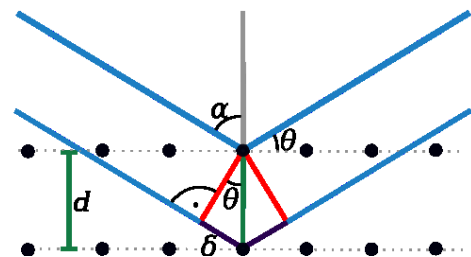


Abbildung 7: Geometrie der Bragg-Interferenz

Gitterebene reflektiert wird. Diese beiden reflektierten Strahlen können nun miteinander interferieren. Ob die Interferenz konstruktiv oder destruktiv ist hängt dabei wieder vom Gangunterschied $\Delta\lambda$ ab, der durch das weitere Eindringen eines Strahls in den Kristall entsteht. Auf diesen Gangunterschied nehmen maßgeblich zwei Dinge Einfluss. Zum der Gitterebenenabstand d und zum anderen der Beleuchtungswinkel α bzw. sein Komplementärwinkel θ , der sich aus $\theta = 90^\circ - \alpha$ ergibt. Wie am

Doppelspalt und Gitter tritt auch hier konstruktive Interferenz auf, wenn $\Delta\lambda = n\lambda$ erfüllt ist. Aus der Geometrie folgt die sogenannte Bragg-Bedingung für konstruktive Interferenz

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.13)$$

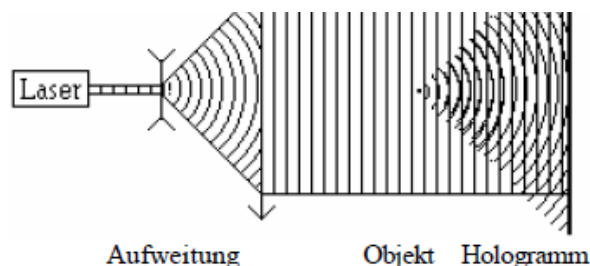
Braggsche Interferenzgleichung

2.7. Prinzip der Holographie

Wie bereits erwähnt bezeichnet die Holographie eine Methode zur vollständigen Speicherung und Wiedergabe von Wellenfeldinformationen, also sowohl von Amplituden als auch von Phaseninformationen. Dies geschieht auf Basis der genannten physikalischen Effekte. Um diese entsprechend zu erreichen werden immer zwei kohärente Wellen überlagert. Zum einen die sogenannte Referenzwelle, die ohne Beeinflussung durch das aufzunehmende Objekt auf die Photoplatte trifft, und zum anderen die Objektwelle, die beim Beleuchten des Objektes mit dem Laserstrahl entsteht. Dabei entstehen auf der Photoplatte Interferenzmuster, die alle Informationen des Wellenfeldes speichern. Um nun das aufgenommene Objekt wieder rekonstruieren zu können, muss die Photoplatte entwickelt werden und anschließend nur noch mit der Referenzwelle bestrahlt werden. Insgesamt ist die Holographie also ein zweistufiges Verfahren. Hologrammaufnahme und Hologrammrekonstruktion finden getrennt voneinander statt.

2.7.1. in-line-Aufbau und Fresnel-Hologramme

Abbildung 8: in-line-Aufbau zur Aufnahme eines Gabor-Hologramms



Eine einfache Anordnung zur Aufnahme, ein sogenannter in-line-Aufbau, ist in Abb. 8 dargestellt. Dabei befindet sich das aufzunehmende Objekt im Strahlengang der Referenzwelle. Als solche

dient hier eine ebene Welle und die Objektwelle ist die Kugelwelle eines einfachen Punktes. Diese Überlagerung kann man nun auch mathematisch erfassen. In der Hologrammebene z_0 (vgl. Abb. 9), welche nahe am Objekt ist (damit ist die Fresnel-Nahfeldnäherung des Kirchhoffschen Beugungsintegrals ist anwendbar), kann man die Kugelwelle in der Nähe der z -Achse durch die quadratische Näherung (2.13) ausdrücken.

$$\vec{E}_O(x, y) = A_O e^{ikz} e^{i\frac{k}{2z}(x^2 + y^2)} \quad (2.14)$$

quadratische Näherung einer Kugelwelle

Für die komplexe Amplitude der ebenen Welle, deren Zeitfaktor hier keine Rolle spielt, gilt analog zu (2.1)

$$\vec{E}_R = A_R e^{ikz_0} \quad (2.15)$$

Komplexe Amplitude einer ebenen Welle ohne Zeitbetrachtung

Aus (2.13) und (2.14) ergibt sich somit für die Intensitäten in der Hologrammebene z_0

$$I(x, y) = |\vec{E}_O(x, y) + \vec{E}_R|^2 = A_O^2 + A_R^2 + 2A_O A_R \cos \left[\frac{\pi}{\lambda z_0} (x^2 + y^2) \right] \quad (2.16)$$

Intensitätsverteilung bei Überlagerung einer ebenen Welle mit einer quadratisch genäherten Kugelwelle

Die Minima und Maxima bilden hier also konzentrische Kreise, deren Abstand voneinander mit wachsender Entfernung vom Mittelpunkt sinkt. Dieses Muster entspricht in binärer Form der sog. Fresnelschen Zonenplatte (Abb.10). Formelmäßig sind die Radien der Maxima gegeben durch:

$$r_n = \sqrt{2n\lambda z_0} \quad (2.17)$$

Ringradien der Interferenzmaxima (Fresnelsche Zonenplatte)

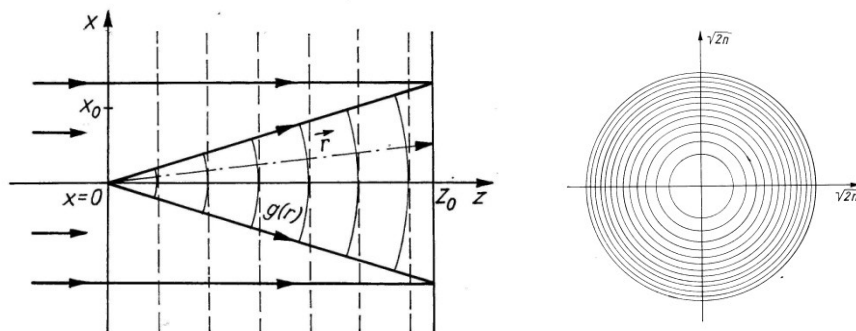


Abbildung 9: Überlagerungsgeometrie bei ebener Welle und Kugelwelle

Abbildung 10: Radien der Fresnelschen Zonenplatte

Nach der Entwicklung der Photoplatte erfolgt die Rekonstruktion des Hologramms durch Beleuchten mittels der bei der Aufnahme eingesetzten Referenzwelle. Das dort gespeicherte Interferenzmuster sorgt dafür, dass die ebene Welle auf einen Punkt P fokussiert wird, der genau den gleichen Abstand vom Hologramm besitzt, wie der Ausgangspunkt der Kugelwelle ihn bei der Hologrammaufnahme hatte. Verwendet man bei der Rekonstruktion eine andere Wellenlänge als bei der Aufnahme so ändert sich die Objektgröße im Verhältnis der beiden Wellenlängen.

$$G = \frac{\lambda_{\text{Rekonstruktion}}}{\lambda_{\text{Aufnahme}}} \quad (2.18)$$

Vergrößerungsfaktor bei der Hologrammrekonstruktion

2.7.2. Computergenerierte Fresnel-Hologramme

Auf diese Art und Weise lassen sich Fresnel-Hologramme von beliebigen Gegenständen berechnen. Das abzubildende Objekt wird in ein Punktmuster aufgerastert, von jedem dieser Punkte gehen Huygenssche Elementarwellen aus, die sich auf der Hologrammebene mit der Referenzebene überlagern und auf der Photoplatte ein entsprechendes Schwärzungsmuster bilden. Allerdings werden die Berechnungen für Objekte, die aus mehreren Punkten bestehen, schnell sehr aufwändig, sodass sie nur mittels Algorithmen am Computer erstellt werden können. Im Prinzip werden dabei alle einzelnen Kugelwellen überlagert und das dabei entstehende Schwärzungsmuster in Graustufen umgewandelt. Die Anzahl der Graustufen ist dabei Abhängig von der Anzahl derer, die das Ausgabemedium realisieren kann. Entsprechende Programme sind in der Literatur, z.B. (Heiß, 1995) oder (Scheller, 1990), ausführlich beschrieben und in einfacheren Versionen auch im Internet zum kostenfreien Download erhältlich (Partheil, 2005).

Allerdings liefern all diese Ansätze nur Grauwerthologramme, die nicht direkt Ausgegeben und Rekonstruiert werden können, sondern zuvor eine photographische Abbildung und Verkleinerung benötigen. Sie werden daher in der weiteren Arbeit nur eine untergeordnete Rolle spielen.

2.8. Hologrammarten

Bevor weitere spezielle Hologrammtypen, ihre mathematischen Beschreibungen sowie die Berechnungsverfahren am Computer vorgestellt werden, soll zuerst noch ein Überblick darüber gegeben werden, welche unterschiedlichen Hologrammtypen es überhaupt gibt und welche sich davon besonders gut für den Einsatz bzw. die Behandlung in der Schule eignen.

Die Klassifizierung von Hologrammen ist in der Fachliteratur nicht immer eindeutig, was sich vor allem durch die Vielzahl an unterschiedlichen Aufnahmeaufbauten erklären lässt. Diese spielen aber bei computergenerierten Hologrammen nur eine sehr untergeordnete Rolle, da der Aufnahmeprozess ja nur simuliert wird. Einzig für die mathematische Beschreibung und die Anschaulichkeit ist die Kenntnis des Aufnahmesettings nützlich. Neben den Aufnahmekonstruktionen lassen sich einige weitere grundlegende Unterscheidungskriterien finden.

2.8.1. Transmissions- vs. Reflexionshologramme

Sogenannte Transmissionshologramme sind dadurch gekennzeichnet, dass das Licht der Referenzwelle bei der Rekonstruktion durch die entwickelte Photoplatte bzw. durch das Hologramm hindurch geht und dabei so gebeugt und interferiert wird, dass die ursprüngliche Objektwelle als wieder entsteht (vgl. Abb. 11). Für den Betrachter wird somit der Eindruck erweckt, dass Objekt befindet sich wirklich hinter dem Hologramm. Es ist also ein virtuelles Bild. Auf der Seite des Betrachters entsteht allerdings auch ein reales Bild, welches allerdings pseudoskopisch ist, also sich wie eine Maske zum Objekt verhält.

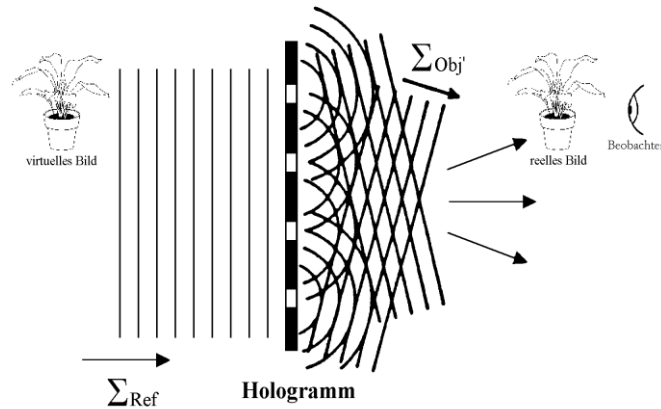


Abbildung 11: Rekonstruktion der Objektwellen beim Transmissionshologramm

Reflexionshologramme hingegen werfen das Licht der Referenzwelle zurück und erzeugen bei diesem Vorgang neben der reflektierten Referenzwelle auch wieder die Objektwelle des zuvor aufgenommenen Gegenstandes. Diese Objektwelle produziert somit ein reelles Bild auf der Seite der einfallenden Referenzwelle.

2.8.2. Amplituden- vs. Phasenhologramme

Ein weiteres zentrales Unterscheidungsmerkmal für Hologramme findet sich in der physikalischen Wirkungsweise mit der das Hologramm die Referenzwelle verändert. Zum einen kann dies mittels eines definierten Schwärzungsmusters geschehen, welches, je nach Schwärzungsgrad an einer bestimmten Stelle, Einfluss auf die Amplitude an dieser nimmt. Hierbei kann es auch durchaus ausreichend sein, wenn es nur zwei unterschiedliche Schwärzungsgrade gibt. Dann ist in den geschwärzten Bereichen die Amplitude gleich null, während die nicht geschwärzten Bereich die Amplitude unverändert lassen. Ein solches Hologramm wird dann binär genannt.

Es gibt aber auch Hologramme, die die Amplitude unverändert lassen und stattdessen zu einer Phasenverschiebung an bestimmten Stellen der Referenzwelle führen. Dies geschieht durch ein bestimmtes Brechungsindexmuster innerhalb des Hologramms. Der Vorteil so gearteter Hologramme besteht darin, dass die rekonstruierte Objektwelle hier eine höhere Intensität besitzt als bei einer

vergleichbaren amplitudenbeeinflussten Variante. Ein Beispiel für diesen Hologrammtyp ist das sogenannte Kinoform.

Inzwischen gibt es aber auch kombinierte Hologramme, die sowohl Phase als auch Amplitude der Referenzwelle verändern.

Alle drei Hologrammtypen lassen sich dabei sowohl als Transmissions- als auch als Reflektionshologramm realisieren.

2.8.3. Volumen- vs. Flächenhologramm

Man kann Hologramme auch danach unterscheiden ob die Beeinflussung der Referenzwelle direkt an der Hologrammoberfläche geschieht oder ob dabei mehrere Schichten eine Rolle spielen. Findet die Veränderung an mehreren aufeinanderfolgenden Schichten statt, so spricht man von einem Volumenhologramm. Hierbei ist die sogenannte Gitterdicke d , welche sich nach

$$d_{\text{Gitter}} = n \frac{\lambda_{\text{Referenz}}}{2} \quad (2.19)$$

Formel zur Berechnung der holographischen Gitterdicke

berechnen lässt, groß im Vergleich zur Wellenlänge der Referenzwelle. Die Variable n ist hier die Anzahl der an der Veränderung beteiligten Schichten. Phasenhologramme sind in der Regel Volumenhologramme und auch beim Arbeiten mit holographischem Filmmaterial handelt es sich zumeist um Volumenhologramme.

Ist $\lambda_{\text{Referenz}}$ hingegen groß gegenüber der Gitterdicke, so wird die Referenzwelle nur an der Hologrammoberfläche verändert und man spricht von einem sogenannten Flächenhologramm.

2.8.4. in-line vs. off-axis Hologramme

In Abbildung 8 im Kapitel 2.7.1. wurde bereits ein Aufbau zur Aufnahme von in-line Hologrammen vorgestellt. Dabei befindet sich das Aufnahmeobjekt zwischen Referenzwelle und Photoplatte. Dieses Verfahren hat zwei entscheidende Nachteile. Es ist zum einen nur für transparente Objekte nutzbar und zum anderen überlagert sich bei der Rekonstruktion die ungebeugte Referenzwelle mit der rekonstruierten Objektwelle, was zu einer schlechten Beobachtbarkeit führt. Um diese Problem zu lösen wurde die off-axis Anordnung entwickelt, deren Prinzip in Abbildung 12 dargestellt ist.

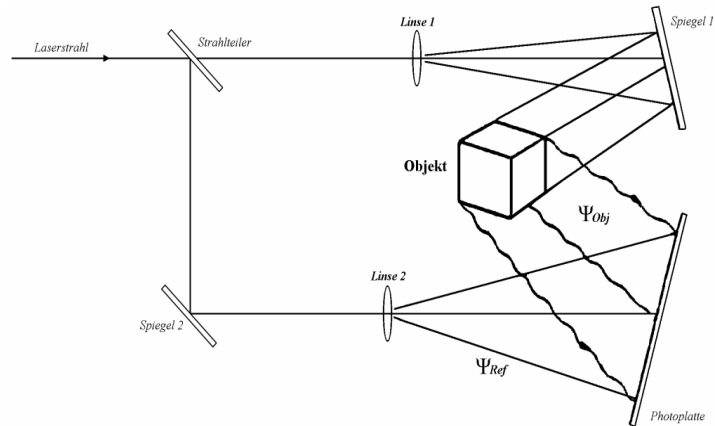


Abbildung 12: Allgemeiner off-axis Holographieaufbau

Hierbei wird der Laserstrahl mittels Strahlteiler geteilt und während ein Teil als ebene Referenzwelle auf die Photoplatte gebracht wird, wird der andere Teil über Spiegel auf das abzubildende Objekt gelenkt und von dort auf die Photoplatte. Mit einem solchen Aufbau können nun auch Hologramme nicht transparenter Objekte hergestellt werden und eine Überlagerung der rekonstruierten Objektwelle mit der ungebeugten Referenzwelle wird vermieden.

Inzwischen gibt es eine ganze Reihe weiterer Holographieaufbauten, die immer für einen bestimmten Anwendungszweck konzipiert wurden. Da diese aber für die weitere Arbeit nicht entscheidend sind, sei an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur, z.B. (Koppelman, et al., 1983b), (Heiß, 1995) oder (Ehlert, 2005).

2.8.5. Fresnel- vs. Fourier-Hologramme

Neben den bereits erwähnten Fresnel-Hologrammen, die mittels einer Nahfeldnäherung des Kirchhoffschen Beugungsintegrals berechnet werden können, gibt es auch Hologramme, die auf Basis der in 2.6. kurz erwähnten Fraunhoferschen Beugungstheorie hergestellt werden. Diese werden mit Hilfe der Fraunhofer-Näherung rechentechisch ermittelt. Die hierbei zugrunde liegende Fernfeldbedingung lautet

$$\frac{\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)_{max} \ll 1 \quad (2.20)$$

Fraunhofer Fernfeldbedingung

wobei z der Abstand zwischen Beugungsebene und Schirm ist und x, y die Entfernung von der optischen Achse angeben. Diese Näherung

führt dazu, dass quadratische Faktoren in der Überlagerung bzw. Faltung von Objektwelle und Referenzwelle gleich eins gesetzt werden können. Insgesamt führt dies dazu, dass das Beugungsintegral weitgehend nur die Fourier-Transformierte der Objektwelle ist. Daher werden Hologramme dieser Art Fourier-Hologramme genannt. Sie spielen heutzutage in der Holographie eine große Rolle und sind sehr viel häufiger zu finden als Fresnel-Hologramme. Dies lässt sich auf die mathematisch etwas einfachere Handhabung zurückführen. Um mit klassischen Mitteln ein Fourier-Hologramm aufnehmen bzw. rekonstruieren zu können, bietet sich ein 4f-Aufbau (Abb.13) an.

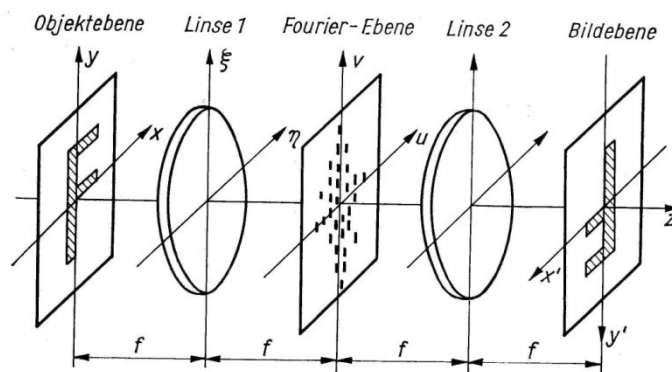


Abbildung 13: 4f-Aufbau zur Aufnahme/Rekonstruktion von Fourier-Hologrammen

Dieser Aufbau zeigt, dass zur Hologrammrekonstruktion hier, im Gegensatz zu Fresnel-Hologrammen, eine Konvexlinse nötig ist. Diese hat fouriertransformierende Wirkung und rekonstruiert gemeinsam mit der Referenzwelle das Ausgangsobjekt, allerdings auf dem Kopf stehend. Beides lässt sich doch jedoch durch geschickte Hologrammkodierung vermeiden. Das Hologramm dient ist dann gleichzeitig auch seine eigene Linse und korrigiert die Drehung.

2.9. CGH-Kodierungen

2.9.1. Direkte und indirekte Wellenfrontwiedergabe

Eine grundlegende Herausforderung zur Erstellung von CGHs ist die Speicherung der komplexen Wellenfeldinformationen in einer Hologrammtransparenz, die eine spätere, möglichst störungsfreie Rekonstruktion des Wellenfeldes ermöglicht. Dazu haben sich im Laufe

der Zeit verschieden Verfahren der Hologrammkodierung entwickelt. Zwei Varianten der indirekten Wellenfrontaufzeichnung, die sich direkt aus den klassischen optischen Aufnahmeprinzipien ableiten lässt, werden hier vorgestellt. Man nennt nach diesem Prinzip kodierte Hologramme auch referenzwellenkodiert, da beim Rekonstruktionsprozess neben der Objektwelle auch die Referenzwelle weiterhin auftaucht.

Bei CGHs mit direkter Wellenfrontaufzeichnung erfolgt die Berechnung ohne Überlagerung von Objekt- und Referenzwelle. Hier wird das Hologramm so berechnet, dass die Referenzwelle durch das Hologramm direkt in die Objektwelle überführt wird. Dadurch wird z.B. in einer in-axis Anordnung die Überlagerung von Objekt- und Referenzwelle vermieden. Die bekannteste Kodierung dieser Art ist das ROACH-Verfahren (Schreier, 1984). Allerdings beruhen diese Verfahren nicht auf dem klassischen Holographieprinzip und Hologramme dieser Art werden auch als Hologramme im weiteren Sinne bzw. als optische Filter bezeichnet. Da sie weniger Anknüpfungspunkte für den Schulunterricht bieten und den Schülerinnen und Schülern keine analogen Modellvorstellungen durch reale Aufnahmeaufbauten erlauben, werden Hologramme dieser Art hier nicht weiter betrachtet.

2.9.2. Optische Kodierung

Diese Methode legt zu Grunde, dass man sowohl die Amplitude und die Phasenverteilung der Referenzwelle als auch die Intensitäten und die Phasenverteilungen des gewünschten Zielobjektes, also des zu rekonstruierenden Objektes, kennt. Analytisch besteht hier also nur die Herausforderung eine entsprechende Hologrammfunktion H zu finden, die durch Beugungs- und Interferenzphänomene dafür sorgt, dass in einer Beugungsordnung aus der Referenzwelle die Objektwelle wird. In den Anfängen der CGHs wurde dazu einfach der optische Aufnahmeprozess mittels Computer simuliert. Die Hologrammfläche wird dabei in ein äquidistantes Punkt- oder Zellenraster eingeteilt und für jeden einzelnen Punkt der entsprechende Strahl der Referenzwelle

mit allen Strahlen des Objektes überlagert. Dabei wird rechnerisch überprüft, ob dort konstruktive Interferenz vorliegt, dann wird dieser Bereich geschwärzt, oder ob sich dort destruktive Interferenz einstellt, dann bleibt der Abschnitt weiß. Es ergibt sich mit dieser Technik ein einfaches binäres Hologramm.

2.9.3. Lohmann-Kodierung

Die Lohmann-Kodierung (Lohmann, et al., 1967), (Brown, et al., 1969) ist die erste entwickelte synthetische Hologrammkodierung. Synthetisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Kodierung nicht die Simulation eines optischen Aufnahmeprozesses zugrunde liegt, sondern dass sie auf Basis mathematischer Überlegungen durchgeführt wird. Es handelt sich dabei wiederum um ein binäres Verfahren für Transmissionshologramme, da viele Ausgabemedien zu dieser Zeit keine anderen Möglichkeiten boten. Lohmann geht dabei von der berechneten Lichtwellenfront aus, also im Prinzip von der Fourier-Transformierten der Objektwelle in der Hologrammebene. Jedem dieser berechneten Werte weist er nun eine quadratische Hologrammzelle zu, welche aus $M \times N$ Subzellen besteht. Jede Grundzelle enthält nun einen Spalt, dessen Größe die Amplitude kodiert. Dabei wird ursprünglich die Breite des Spaltes konstant gehalten und nur seine Höhe verändert. Die Verschiebung des Spaltes aus der Zellenmitte kodiert die Phasenverschiebung an dieser Stelle. Aus mathematischer Sicht (vgl. (Schreier, 1984)) wird dabei folgende Transparenzfunktion kodiert

$$H_L(u, v) = \sum_M \sum_N \text{rect} \left(\frac{u - M \cdot \delta u - P_{MN} \cdot \delta u}{q \cdot \delta u}, \frac{v - N \cdot \delta v}{h_{mn} \cdot \delta v} \right) \quad (2.21)$$

Transparenzfunktion für die binäre Lohmannkodierung

wobei u, v die Koordinaten der Subzellen darstellen.

Später entwickelten Brown und Lohmann auch eine analoge Kodierung, bei der die Spaltbreite anstelle der Spalthöhe variiert wurde (Brown, et al., 1966)

Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass im Vergleich zum Ausgangsobjekt zusätzlicher Speicherplatz benötigt wird, da sich die

Größe des Hologramms aus dem Produkt der Objektmatrix und der Größeneinteilung der Subzellen ergibt.

3. Holographie in der Schule

3.1. Anforderungen der klassischen Holographie

Holographie ist heutzutage sicher ein eher selten gewähltes fakultatives Thema im Schulunterricht. Um die exakten Gründe hierfür zu ermitteln, wären sicherlich eine eigene Studie und eine eigene Arbeit über das Thema nötig, aber es ist naheliegend einen Grund dafür in den scheinbar hohen Anforderungen an die Lernumgebung zu sehen. Die typischen Erfordernisse zur Unterrichtung der klassischen Holographie in einer Art und Weise, die gewisses Maß an Schülerzentrierung bzw. selbstständiger Schüleraktivität zulässt, sind nämlich sehr breit gefächert. Zum einen wird ein robuster, erschütterungssicherer Aufbau zur Aufnahme von Hologrammen benötigt. Und zum anderen natürlich holographisches Filmmaterial, das belichtet werden kann, sowie ein Photolabor, in dem das Material entwickelt und für Transmissionshologamme auch noch gebleicht werden kann. Eine Zusammenstellung aller dieser benötigten Materialien der auf Physikdidaktik spezialisierten Firma Phywe kostet aktuell 7568,40€ (PHYWE Systeme GmbH und Co. KG, 2010) und ist somit für viele Schulsammlungen einfach zu kostenintensiv. Auch musste an vielen Schulen das früher einmal übliche Photolabor weichen, was folglich die eigene Herstellung von Hologrammen nahezu unmöglich macht. Dies ist allerdings maßgebliche Voraussetzung, wenn Schülerinnen und Schüler sich selbstbestimmt direkt am Objekt mit dem Thema auseinandersetzen sollen. Neben Finanzmitteln und Räumlichkeiten fordert eine klassische Unterrichtseinheit zur Holographie sicherlich auch einen großen Zeiteinsatz, was besonders im Rahmen der Verkürzung des Gymnasiums von neun auf acht Schuljahre nur schwer zu vertreten ist.

3.2. Gründe für die Holographie

Dennoch scheint das Thema einigen Kultusministern bzw. den für die Rahmenpläne zuständigen Gremien immer noch für die Schule geeignet. Dies liegt sicher auch daran, dass die der Holographie

zugrunde liegenden physikalischen Phänomene ein fester Bestandteil des Oberstufenstoffs sind und auch im Physik-Grundkurs ausführlich gelehrt wird. Somit kann bei der Behandlung der Holographie auf der theoretischen Ebene relativ leicht an bereits vorhandenes Schülerwissen angeknüpft bzw. darauf aufgebaut werden. Und sicher unbestritten ist, dass die Technik der Holographie immer mehr Einzug in unseren Alltag gefunden hat. Es gibt aber auch noch weitere gute Gründe für die Wahl dieses Themas. Besonders in den Bereichen des Modelllernens, des Lernens über Modelle bzw. Modellbildung und des Lernens von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen bietet der Bereich der Holographie eine Vielzahl an Chancen und Möglichkeiten. Auf diesen Sachverhalt, der auch in der aktuellen Diskussion über die allgemeinen Bildungsstandards eine Rolle spielt, wird in Kapitel XYZ noch ausführlicher eingegangen.

Um diese Chancen und Möglichkeiten allerdings nutzen zu können, müssen ohne Zweifel die genannten hohen strukturellen und finanziellen Anforderungen reduziert werden. Natürlich wäre dies auch einfach durch den Einsatz bereits gefertigter Hologramme anstelle von selbst produzierten möglich, allerdings soll im Folgenden ein anderer Weg, ein Weg über die binäre Holographie, ausführlich präsentiert werden, der es den Schülerinnen und Schülern erlaubt eigenständig, auch durch Experimente, Phänomene der Holographie zu entdecken, zu beschreiben und zu verstehen.

3.3. Vorbereitende Pflichtthemen aus dem Lehrplan

3.3.1. Einführungen in die Beugung

Beugung lässt sich mit Hilfe von Wasserwellen anschaulich demonstrieren, aber auch mittels Licht an einem Spalt. Oft werden auch beide Veranschaulichungsmethoden genutzt. Für eine spätere Behandlung der Holographie in ihrer binären Form ist die Betrachtung der Beugung von Licht an einem Spalt von Vorteil, da dies bereits ein diffraktives optisches Element ist und damit natürlich der Holographie verwandter ist. In wie weit das Phänomen der Beugung auch mathematisch erfasst und beschrieben wird, spielt für die folgenden

Holographiebetrachtungen keine Rolle, da diese weitgehend phänomenbasiert und qualitativ konzeptbasiert, aber nicht streng mathematisch geführt werden.

3.3.2. Einführungen in die Welleninterferenz

Auch wird hierbei gibt es in der Regel zwei unterschiedliche Wege der Einführung. Der sicherlich häufiger genutzte Weg schließt sich direkt an die Beugung von Licht am Spalt an und führt über die Beugung am Doppelspalt und am optischen Gitter. Hierbei werden die beiden grundlegenden Phänomene der Holographie also schon verknüpft, was natürlich ideale Voraussetzungen zur späteren Behandlung von Transmissionshologrammen bietet.

Die zweite Variante zur Thematisierung von Welleninterferenz ist die Behandlung von Interferenz an dünnen Schichten. Hier kann zum Beispiel das Phänomen der Newtonschen Ringe beobachtet und ausgewertet werden. Diese Betrachtungen liegen den Reflexionshologrammen näher als den Transmissionshologrammen, was sich eher nachteilig auf die hier geplante Anknüpfung der Holographie auswirkt, da dabei weitgehend einfache, selbsterstellte Transmissionshologramme im Zentrum stehen.

Auch hier spielt der Rahmen der mathematischen Erfassung nur eine untergeordnete Rolle für den weiteren Unterrichtsverlauf.

3.4. Anfangsvoraussetzungen auf Schülerseite

3.4.1. Vorkenntnisse über Holographie

Eine grundlegende Frage für jede Lehrerin bzw. jeden Lehrer bei der Gestaltung einer Unterrichtseinheit ist sicherlich die nach dem Vorwissen auf Seiten der Schülerinnen und Schüler. Oft ist dies eine Frage ohne eindeutige, klare Antwort, da der Bildungs- und Lebenshintergrund von ca. 25 Schülerinnen und Schülern meist sehr unterschiedlich ist. Im Bereich der Holographie können die Lehrerinnen und Lehrer jedoch weitgehend davon ausgehen können, dass auf Schülerseite nur wenige bis sehr wenige bewusste Vorkenntnisse hierzu vorhanden sind. Bewusste Vorkenntnisse meinen in diesem

Zusammenhang Kenntnisse und fachliche Vorstellungen, die die Schülerinnen und Schüler besitzen und konkret mit dem Themengebiet in Verbindung bringen können. So haben Horn und Mikelskos in einer Befragung von 166 Schülerinnen und Schülern Brandenburger Gymnasien ermittelt, dass nur 12 % bereits ein echtes Hologramm gesehen haben. Weitere 22 % verbanden mit dem Begriff etwas, das sie aus filmischen Darstellungen kennen. Einige wenige stellten eine Beziehung zu Wackelbildern o.ä. her, während fast zwei Drittel keinerlei Vorstellungen zu Holographie besaß (Horn, et al., 2000b). Daraus lässt sich folgern, dass sicher der ein oder andere Schüler der Lehrkraft ein Einsatzgebiet von Hologrammen nennen kann bzw. einen Ort kennt, an dem sich ein Hologramm befindet, aber in Bezug auf die physikalische Funktionsweise von Hologrammen sind in der Regel keine fundierten Aussagen zu erwarten. Eine Ausnahme hiervon könnten einzelne Personen bilden, die sich aus eigenem Interesse mit dem Themengebiet beschäftigt haben bzw. über die Photographie Zugang zur Holographie gefunden haben. Solche einzelnen Ausnahmen lassen sich aus Lehrersicht jedoch leicht erkennen und anschließend mit bekannten Methoden z.B. als Experte entsprechend in den Unterricht integrieren.

Für das Gros jedoch ist die Holographie ein physikalisch neues, unbekanntes Thema, das jedoch, wie bereits die Theorie in Kapitel 2 deutlich gemacht hat, auf Phänomenen beruht, die in der Regel in der Schule behandelt werden müssen. Und da dies auch in der Qualifikationsphase der Sekundarstufe II geschieht, ist der Lehrer hier sehr genau im Bilde, welche theoretischen Grundlagen der Kurs insgesamt mitbringt, schließlich hat er diese Grundlagen meist selbst unterrichtet.

3.4.2. Mögliche Fehlvorstellungen

Trotz der Tatsache, dass die Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler über die Holographie nur einen geringen Umfang besitzen, müssen dennoch mögliche Fehlvorstellungen im Unterricht bedacht werden. Schließlich müssen diese ja nicht immer schon vorhanden

sein, sondern können erst gerade wegen einer unsachgemäßen Behandlung der Thematik im Unterricht entstehen.

Bei der Betrachtung der Fehlvorstellungen ist es zweckmäßig, neben der Erfassung genereller Misskonzepte, den Gesamtkomplex der Holographie in verschiedene Teilbereiche zu zerlegen und sich in diesen etwaige falsche Konzepte anzuschauen.

Generelle Fehlvorstellungen bringen vor allem diejenigen Schülerinnen und Schüler mit, die „Hologramme“ aus filmischen Darstellungen kennen. In Science-Fiction-Filmen wie Star Trek werden Hologrammen etwa physische und menschliche Eigenschaften zugeordnet. Man kann sie anfassen, man kann mit ihnen reden und sie selbst können frei im Raum agieren.

Fehlvorstellungen aus dem Bereich der Herstellung von Hologrammen werden ebenfalls durch filmische Darstellungen aufgebaut, unterstützt oder gestärkt. So erklären viele Schülerinnen und Schüler den Herstellungsprozess als computergeneriert, da dies in quasi allen bekannten Science-Fiction-Werken der Fall ist (Horn, et al., 2000a). Aber auch diejenigen, die bereits ein echtes Hologramm gesehen haben, bringen Fehlvorstellungen mit. So gehen nahezu alle Schülerinnen und Schüler, die schon Kontakt mit Hologrammen hatten, davon aus, dass diese immer dreidimensional sind.

Ein weiterer wichtiger Teilbereich in welchem Fehlvorstellungen auftreten können, ist der der Erfassung und Beschreibung von Licht. So wird den Schülerinnen und Schülern in der Sekundarstufe I die geometrische Optik gelehrt, welche auf dem Strahlenmodell von Licht beruht. Im Rahmen des Oberstufenunterrichts kommen hierzu noch mindestens zwei weitere. Zum einen die Wellenvorstellung von Licht, die im Rahmen der erwähnten Themen Beugung und Interferenz eine zentrale Rolle spielt, und zum anderen die Teilchenvorstellung, welche zur Erklärung des photoelektrischen Effektes von Nöten ist. Die Herausforderung für die Schülerinnen und Schüler besteht nun darin immer klar und sauber zwischen den einzelnen Modellen zu trennen, was allerdings nur einem Teil sicher gelingen dürfte. Ein Großteil wird sich hingegen eigene Hybridmodelle „basteln“, welche sicherlich nicht

immer fachlich angemessen sind. Und ob diese dazu geeignet sind das auf der Wellenvorstellung basierende Phänomen der Holographie zu erklären, ist mehr als fraglich. An dieser Stelle wird wiederum deutlich, dass die Holographie besonders im Bereich des naturwissenschaftlichen Arbeitens und im Umgang mit naturwissenschaftlichen Erklärungsmodellen große Möglichkeiten, aber auch einige Schwierigkeiten bietet.

Auch rund um die Interferenz von Wellen gibt es eine Reihe von Schülervorstellungen, die Einfluss auf den Unterricht nehmen bzw. darin Beachtung finden sollten. So zeigen Ambrose et al. eine Reihe von Problemen im Umgang und in der Unterscheidung von Fachbegriffen wie Wellenfront, Elementarwelle usw. (Ambrose, et al., 1999). Ebenso haben Schülerinnen und Schüler Probleme bei der Interpretation graphischer Darstellungen von Wellen Schwierigkeiten. Speziell bei der Holographie können Fehlvorstellungen bei der Verallgemeinerung der Interferenzoptik zu Tage treten. So beschreiben Horn und Mikelskis etwa Probleme beim Übergang von eindimensionalen Wellen hin zu Wellenfeldern und Zweifel an der Interferenzfähigkeit von Wellen, die nicht parallel zueinander verlaufen (Horn, et al., 2001). Weiter ist es möglich, dass der Gangunterschied zwischen zwei Wellen gleichbedeutend mit der unterschiedlich langen Wegstrecke, die die beiden Wellen zurücklegen, verstanden wird. Dabei geht die eigentliche Interferenzbedingung, nämlich dass der Gangunterschied gerade ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein muss, verloren.

Bei der Rekonstruktion kommen Fehlvorstellungen aus der klassischen Optik zum tragen. So ist die Unterscheidung zwischen virtuellem und realem Bild bei Fresnel-Transmissionshologrammen problembehaftet. Ebenso könnte die Bildentstehung einfach als Durchleuchtung des Hologramms gesehen werden, vor allem dann, wenn das Hologramm selbst eine gewisse Ähnlichkeit mit dem abgebildeten Objekt hat. Auch die Unterscheidung von Hologramm und rekonstruiertem Objekt selbst kann von Fehlvorstellungen belastet werden, da in Filmen die Rekonstruktionen generell als das Hologramm bezeichnet werden,

während in der Holographie der entwickelte Film oder Vergleichbares, das beim Bestrahlen mit der Referenzwelle wieder die eigentliche Objektwelle rekonstruiert, als Hologramm bezeichnet wird.

Es können allerdings auch fehlerhafte Verallgemeinerungen von Alltagserfahrungen mit Hologrammen sein, die Fehlvorstellungen auf Seiten der Schülerinnen und Schüler bewirken. So ist die Gefahr groß z.B. von den Hologrammen auf Geldscheinen oder Kreditkarten auszugehen und zu sagen, dass alle Hologramme beim kippen die Farbe ändern oder auch mit normalem Tageslicht zu beobachten sind.

3.4.3. Motivationsmöglichkeiten

Auch wenn die Holographie insgesamt ein Themengebiet darstellt, das meist nur Physik-Leistungskursen vorbehalten ist und bleiben wird, und somit davon ausgegangen werden kann, dass die Schülerinnen und Schüler per se an physikalischen Sachverhalten interessiert und entsprechend motivierter sind als die durchschnittlichen Teilnehmer eines Grundkurses, so sollte doch auch hier nicht auf eine motivierende Themenpräsentation verzichtet werden. Hierbei können zum Beispiel filmische Darstellungen von Hologrammen, die besonders mit Fehlvorstellungen belastet sind, genutzt werden. Die holographischen Figuren dürften vor allem bei den männlichen Kursteilnehmern bekannt und die ein oder andere auch beliebt sein, was sicher zu einer gewissen Aufgeschlossenheit dem Thema gegenüber führen kann. Eine weitere Möglichkeit der Motivation kann die Thematisierung des Vorkommens von Hologrammen in unserem Alltag sein. Gerade das Vorkommen auf Geldscheinen könnte hier attraktiv sein.

Sicher außergewöhnlich und daher besonders interessant und evtl. motivationsfördernd ist die Verbindung von Physik und Kunst, die sich so in kaum einem anderen Themenfeld finden lässt. Die Möglichkeit Objekte dreidimensional aufzunehmen und dem Zuschauer vorzuführen eröffnet hier neue Wege und lässt Raum für Kreativität. Ebenso das durchaus unterschiedliche Aussehen von Hologramm und Rekonstruktion, was zusätzlich noch für Überraschung beim Betrachter sorgen kann. Weiter ist es mit Hilfe von CGHs sogar möglich,

Hologramme von Gegenständen zu erstellen, die gar nicht real existieren müssen.

Die Unterschiede zur normalen Photographie sind ein Punkt, der eventuell die weiblichen Kursteilnehmer besonders anspricht. Ein Problem bei allen genannten Punkten ist, dass für eine verständliche und vollständige Erklärung der Phänomene schon ein nicht geringes Verständnis für die Holographie notwendig ist. So ist schwerlich möglich in nur einer Doppelstunde die Unterschiede von Holographie und Photographie verständlich zu machen oder die Funktionsweise von Hologrammen auf Geldscheinen zu klären. Daher besteht ein gewisses Risiko, dass ein Teil der Lerngruppe sich nach den ersten Stunden unzufrieden aus dem Unterricht ausklinkt. Um dem entgegenzuwirken müssen die theoretischen Lerneinheiten entsprechend kurz gehalten werden und den Schülerinnen und Schülern immer wieder überraschende Phänomene oder Erscheinungen geboten werden, zum Beispiel durch vorgefertigte Hologramme.

3.5. Mögliche Unterrichtseinstiege in die Holographie

Bevor im Unterricht explizit CGHs behandelt werden können, scheint es als sinnvoll und notwendig mit den Schülerinnen und Schülern das Grundprinzip der Holographie zu erarbeiten. Hierfür lassen sich in der Literatur bereits einige Ideen finden, die jedoch kritisch auf ihre Aktualität hin und auf ihre Sinnhaftigkeit als Vorbereitung für die Thematisierung von binären CGHs geprüft werden müssen.

So schlägt Koppelman eine vermeintlich anschauliche Einführung in die Holographie mit Hilfe von Moiré-Modellversuchen vor (Koppelman, et al., 1983b). Dabei arbeitet er mit einer ganzen Reihe von Overheadfolien, die Wellenfelder von Punktquellen, ebenen Wellen usw. zeigen und je nach Bedarf übereinander gelegt werden können, was schnell zu einer gewissen Unübersichtlichkeit führt. Auch stellt dieser Zugang relativ hohe Anforderungen an die graphische Interpretationsfähigkeit von Schülerinnen und Schülern. Abgesehen davon ist ein solcher Einstieg in das Thema alles andere als schülerzentriert, bietet kaum Raum für eigene Aktivität und ist auch in

Bezug auf die motivationalen Aspekte kritisch zu betrachten. Weiter bemängeln Horn et. al, dass bei diesem Themeneinstieg ein möglicher Zirkelschluss vollführt wird, indem die Holographie durch das holographische Prinzip erklärt wird (Horn, et al., 2003).

Pientka wählt einen mathematischeren Einstieg in Anlehnung an die Abbildungstheorie Abbés (Pientka, 1973), was allerdings das Risiko birgt viele Schülerinnen und Schüler zu überfordern, gerade wenn nicht alle Kursteilnehmer gleichzeitig einen Mathe-Leistungskurs besuchen.

Weiter ist die stark mathematische Betrachtung der Thematik sicherlich auch bei einem Physik-Leistungskurs nicht besonders motivationsfördernd.

Bartelt et al. nähern sich der Holographie direkter über die Elementarisierung durch Betrachtung sehr einfacher Fälle (Bartelt, et al., 1986). Dies bietet für die Schülerinnen und Schüler die Chance die Phänomene nicht nur in der Theorie oder auf Folien, sondern auch direkt im Experiment bzw. in der Rekonstruktion von entsprechenden Hologrammen zu sehen. Allerdings fehlt in diesem Ansatz noch die Anlage für einen theoretischen Zugang zur Thematik und zur Erklärung der eigentlichen Hologrammentstehung. Dieser ist allerdings für ein grundlegendes Verständnis der Holographiephänomene notwendig. Einen solchen elementarisierten theoretischen Zugang über die einfache Überlagerung einer ebenen Welle mit einer Kugelwelle, was die Fresnel-Zonenplatte liefert, hatte bereits zuvor Audretsch entwickelt (Audretsch, 1976). Heiß versuchte diese beiden Aspekte, den theoretischen Zugang über die Fresnel-Zonenplatte und das anschauliche Phänomen der Holographie einzelner Punkte zu verbinden (Heiß, 1982). Dabei liefert er auch eine erste Erklärung für die Möglichkeit der dreidimensionalen Darstellung in der Rekonstruktion und auch der Aspekt der holographisch-optischen Elemente (HOE) findet Eingang in die Unterrichtsreihe. Als zentrales Problem bei diesem Ansatz bleibt weiterhin die fehlende Möglichkeit von sinnvoller Schüleraktivität und somit evtl. das Problem nachlassender Schülermotivation.

Um diese Hürde zu meistern entwickelten Horn et al. im Rahmen der Planung einer Unterrichtsreihe zur Holographie das Potsdamer Holographie-Simulationsprogramm, welches auf der Tagungs-CD der Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft des Jahres 2003 veröffentlicht wurde und für Unterrichtszwecke kostenfrei genutzt werden darf (Horn, et al., 2003). Es knüpft an die Ideen von Heiß an und bietet zum einen die Möglichkeit zwei ebene Wellen unter einem wählbaren Winkel α zu überlagern. Zum anderen kann eine ebene Welle mit einer frei positionierbaren Punktquelle überlagert werden. Die entstehenden Interferenzbilder werden dabei auf einer Art Holographiefilm festgehalten und können in der Simulation auch entwickelt werden. Ebenfalls lässt sich die Rekonstruktion der entwickelten Hologramme simulieren. Zu erwähnen ist dabei noch, dass das Simulationsprogramm bereits eine didaktische Reduktion beim Aufzeichnungsprozess einsetzt, die auch später noch eine Rolle spielt. So werden auf dem Holographiefilm nur weiße und schwarze Bereiche sichtbar, es entsteht also ein binäres Hologramm. Durch ein einblendbares Gitternetz bietet das Programm weiter auch die Möglichkeit für eine mathematische Auswertung der Aufnahmen bzw. Rekonstruktionen. Leider sind die entstehenden Hologramme nur eindimensional, sodass die typischen Ringe der Fresnel-Zonenplatte nicht direkt sichtbar werden. Dennoch lässt sich mit Hilfe der Simulationen gut und bei entsprechender Aufgabenauswahl bzw. Aufgabenaufbereitung auch schülerzentriert in die Grundlagen der Holographie einsteigen.

Dennoch ist es sowohl für die Schülerinnen und Schüler als auch für den Lehrer sicher wenig zufriedenstellend, sich der Holographie nur theoretisch und mittels Simulationen zu nähern. Allerdings verhindern die hohen Anforderungen der klassischen Holographie, wie in 3.1. ausgeführt, oft die eigene Herstellung von Hologrammen.

3.6. Übergang zur CGHs

Einen möglichen Ausweg aus diesem Dilemma bietet der Übergang von klassischen Hologrammen hin zu computerberechneten Hologrammen. Diese machen komplizierte, schwingungsresistente Aufbauten zur Hologrammaufnahme überflüssig, benötigen kein holographisches Filmmaterial und kein Photolabor mehr und können von den Schülerinnen und Schülern selbst hergestellt werden - sowohl in der Schule als auch zu Hause. Allerdings ist hierzu ein entsprechendes Computerprogramm von Nöten, was aktuell noch ein Problem darstellt. Es existieren nur im Moment nur zwei verschiedene GNU-lizenzierte und somit auch in der Schule kostenfrei nutzbare Programme, die in der Lage sind Hologramme zu berechnen. Eines der beiden basiert auf dem von Heiß veröffentlichten Turbopascal-Quellcode (Heiß, 1995) und bietet lediglich die Möglichkeit aus BMP-Dateien Graustufen-Transmissionshologramme zu berechnen. Das Computer Generated Hologram (CGH) Construction Kit (The CorticalCafe, 2007) hingegen erlaubt sowohl die Berechnung von Graustufenhologrammen als auch die von binären Hologrammen.

Da einfache binäre Hologramme bereits mit aktuellen Laserdruckern ausgegeben werden können, wird dieses Programm im weiteren Verlauf eingesetzt. Für Graustufenhologramme ist dies nicht möglich, da Laserdrucker keine lineare Grauabstufung besitzen, sondern diese per Halbtonrasterung erreichen, also je nach Grauwert eine bestimmte Anzahl an Rasterzellen schwärzen und den anderen Teil weiß lassen.

3.7. Erzeugung binärer Hologramme mittels CGH Construction Kit

3.7.1. Programmfunktionen

Sowohl das bereits compilierte, in Java geschriebene Programm als auch das der Quellcode zum CGH Construction Kit stehen kostenfrei auf der Homepage http://corticalcafe.com/prog_CGHmaker.htm zum Download bereit. Das Kit läuft unabhängig vom jeweiligen Betriebssystem und benötigt als einzige Voraussetzung nur eine

installierte Version von JAVA der Firma Sun Microsystems, welche sich in der Regel auf jedem modernen PC befindet. Weiterhin bietet die Webseite einige Infos zur Funktionsweise des Programms und praktische Anwendungshinweise.

Es ist in der Lage selbstfokussierende Fourier-Hologramme zu berechnen und diese sowohl als Graustufen- als auch als Binärhologramm auszugeben. Als Eingangsobjekt können dabei Bilder im gif-Format, beliebige, in einem xml-Dokument beschriebene Punktmengen oder mit Java erfasste Objekte dienen.

Das Programm selbst verfügt über eine einfache, in Abbildung 14 dargestellte, graphische Oberfläche, mittels der sich alle wichtigen Einstellungen vornehmen lassen und die auch für Schülerinnen und Schüler nach kurzer Einführung sicher handhabbar ist.

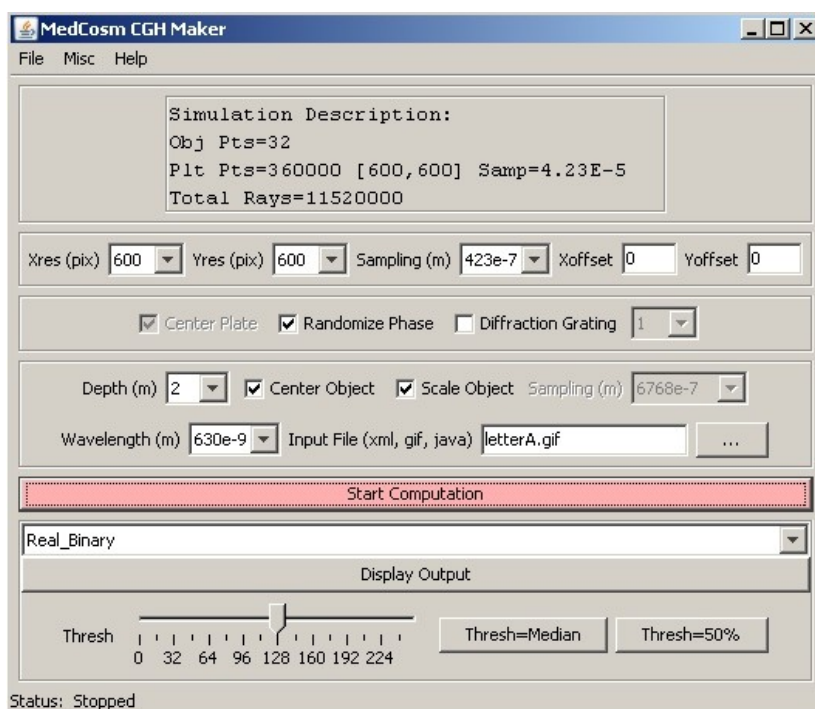


Abbildung 14: Bedienoberfläche des CGH Construction Kit

Über die Felder Xres bzw. Yres lässt sich die Anzahl der Pixel des zu berechnenden Hologramms festlegen. Sampling gibt den Abstand zwischen zwei Pixeln im Ausgabemedium an, ist also von der möglichen Druckauflösung des verwendeten Laserdruckers abhängig, und die Offset-Eingabefelder ermöglichen eine Verschiebung des Objekts aus dem Zentrum des Hologramms. Dies dient zur Verminderung der Überlagerung von rekonstruiertem Objekt und

ungebeugtem Referenzstrahl auf dem Schirm. Randomize Phase sollte bei der Berechnung der Hologramme immer aktiviert sein, da es eine Zufallsphase über das Ausgangsobjekt legt und damit im Ergebnis die Fehlabbildungen reduziert, also für eine bessere Rekonstruktion sorgt. Die Option Diffraction Grating deaktiviert alle anderen Funktionen und erzeugt ein Strichgitter gewählter Ordnung. Mit Hilfe dieses Gitters kann die Druckauflösung überprüft werden. Die Einstellung Depth beeinflusst die Fokussierung, die in das Hologramm mit eingerechnet wird. Der hier eingestellte Abstand sollte in etwa dem Abstand zwischen Hologramm und Schirm bei der Rekonstruktion entsprechen. Centre und Scale Object sorgen dafür, dass das Objekt in ursprünglicher Größe rekonstruiert wird. Mittels Wavelength wird die Wellenlänge des Laserlichtes eingestellt, mit dem das Hologramm standardmäßig rekonstruiert werden soll. Über den Punkt Input file kann das Ausgangsobjekt gewählt werden.

Nach der Berechnung ermöglicht das Programm eine Reihe verschiedener Ausgabearten, von denen sich wie erwähnt aber nur die binären Formen zum Ausdruck per Laserdrucker eignen. Im Unterricht kann sich dabei nur auf die Ausgabeart real binary beschränkt werden, da diese in der Regel die besten Rekonstruktionsergebnisse liefert.

3.7.2. Schwächen des CGH Construction Kit

Die Berechnungszeit liegt für Hologramme der Größe 600x600 Pixel in der Regel bei ca. einer Minute und so in einem vertretbaren Rahmen. Dabei verwendet das Programm einen Ray tracing Algorithmus ähnlich der in Kapitel 2.9.2. beschriebenen optischen Codierung. Dieser liefert allerdings nur für relativ einfache Objekte etwa in der Größe von 40x40 Pixel akzeptable Ergebnisse, die sich auch entsprechend rekonstruieren lassen. Weiter kann es sich als problematisch erweisen, dass in allen Auswahlfeldern nur vordefinierte Werte eingestellt werden können und somit eine problemlose Anpassung an die Gegebenheiten vor Ort nicht immer möglich ist. Auch bei möglichen Weiterentwicklungen im Bereich der Druckauflösung könnte dies zu Problemen führen. Ebenso ist die Vielzahl der Ausgabemöglichkeiten

für die Schülerinnen und Schüler eher verwirrend als hilfreich. Vor allem vor dem Hintergrund, dass mittels des Programmes nur Amplituden-Transmissionshologramme erstellt werden können, erscheint eine Ausgabemöglichkeit mit der Bezeichnung phase als ungeeignet.

Weiter stellt die Überlagerung der ungebeugten Referenzwelle mit der rekonstruierten Objektwelle ein Problem dar, dass sich auch durch Eingabe eines Offset-Wertes nicht vollständig beheben lässt. Ebenso ist das Auftreten der -1. Beugungsordnung sehr unterschiedlich ausgeprägt. Bei manchen Objekten ist das neben der eigentlichen Rekonstruktion, die von der +1. Beugungsordnung erzeugt wird, auch das auf dem Kopf stehende und seitlich verschobene Bild der -1. Beugungsordnung zu sehen, wie es bei Fraunhofer-Hologrammen typisch ist. Bei anderen Objekten hingegen lässt sich dies nicht identifizieren und teilweise wird es bei symmetrischen Objekten sogar genutzt um zusammen mit der +1. Beugung die Rekonstruktion zu bilden.

3.8. Rekonstruktionsaufbauten

4. Chancen und Probleme

- 4.1. Erkenntnismöglichkeiten bei der Arbeit mit binären CGHs**
- 4.2. Probleme von CGHs aus dem Construction Kit**
- 4.3. Weitere Vertiefung**
- 4.4. Alternativen**
- 4.5. Fächerübergreifende Inhalte und Möglichkeiten**
- 4.6. Sicherheitsvorschriften beim Umgang mit Lasern**

5. Ausblick

6. Fazit