

104 – Holographie

F-Praktikum – Hilfsmittel der modernen Experimentalphysik

Raphael Kobold
Tobias Krähling <Tobias.Kraehling@SemiByte.de>

20.04.2008
Version: 1.1

Stichworte: Holographie, Interferenz, Objektwelle, Referenzwelle, Film, Entwicklung, Gitter, Rekonstruktion, Bragg-Bedingung, Laser, kohärentes Licht
Literatur: [BS03], [Dem06], [Möl07]

1. Einleitung

Begründer des Arbeitsbereiches „Holographie“ ist der ungarisch-britischen Physiker Dennis Gábor (1900-1979) mit seiner Veröffentlichung „A new microscopic principle“ (1948), der für die Entdeckung der Holographie 1971 den Physik-Nobelpreis erhielt. Das Wort „Holographie“ setzt sich aus den beiden griechischen Wörtern „holos“ (ganz) und „graphein“ (schreiben) zusammen. Im Gegensatz zur gewöhnlichen Photographie, wo nur die Intensität und Farbe (Frequenz, Wellenlänge) des einfallenden Lichts aufgezeichnet wird, ist es bei der Holographie möglich, auch die Phaseninformation aufzuzeichnen. Dies bietet die Möglichkeit, auch die Tiefeninformation eines Objektes aufzuzeichnen und damit – in gewissen Grenzen – ein räumliches Abbild des Objektes zu erstellen. Durch die zusätzlich gespeicherte Phaseninformation ist es somit möglich, ein dreidimensionales Abbild zu erstellen. Um rekonstruierbare Phaseninformationen zu erhalten ist es bei der Erstellung unabdingbar, eine möglichst gute kohärente Lichtquelle zu verwenden – daher erhielt die Holographie erst mit der Entwicklung der Laser als gute kohärente Lichtquelle praktische Bedeutung (vgl. [Möl07]).

Die Holographie wird heute bereits massenhaft als Sicherheitsmerkmal verwendet, beispielsweise auf Geldscheinen, Pässen, Fahrkarten usw., da sich Hologramme mit herkömmlichen Photokopierern nicht reproduzieren lassen. Andere technische Anwendungen ist die „Holographische Interferometrie“, mit der sich kleinste Verformungen von Objekten nachweisen lassen. Zur Entzifferung von Keilschriften wird in der Archäologie holographische Abbildungen ebenfalls angewendet. Dicke Reflexionshologramme können als Wellenlängenfilter verwendet werden, die in der Telekommunikation von Interesse sind – hier ist insbesondere die Schmalbandigkeit des Filters von Interesse, da somit bei optischen Übertragungen mehr Kanäle zur Verfügung stehen würden und mehr Daten übertragen werden können. Ein anderes Einsatzgebiet von holographischen Gittern ist die Möglichkeit, kalte Neutronen mit Beugungseffizienzen von mehr als 50% beugen zu können. Ein größeres aktuelles Forschungsgebiet ist der „Holographische Speicher“, da sich hiermit riesige Datenmengen archivieren lassen würden (ca. 10 TB in dem Volumen einer gewöhnlichen CD/DVD) (vgl. [BS03]).

2. Grundlagen

Grundprinzip der Holographie ist die Überlagerung einer Objektwelle mit einer Referenzwelle – durch Interferenz kann die Form der Phasenfront sichtbar gemacht werden und auf entsprechenden Speichermedien (Film) festgehalten werden. Die ursprüngliche Phasenfront

(Signalwelle) kann durch Beugung rekonstruiert werden, indem das Hologramm mit der Referenzwelle beleuchtet wird.

Als *elementare Hologramm* wird ein Gitter bezeichnet, welches durch zwei ebene Wellen (Signal- und Referenzwelle) erzeugt wird (siehe Abb. 5, Abschnitt 3.6). Wird das holographische Gitter mit der ebenen Referenzwelle beleuchtet, so wird die Signalwelle durch Beugung rekonstruiert.

Die Rekonstruktion von beliebigen Lichtwellen läßt sich wie folgt zeigen: Seien $S, R \in \mathbb{C}^3$ die Amplituden der Signal- und Referenzwelle. Intensität und Amplitude sind proportional zueinander, für die Intensitätsverteilung I des Interferenzmusters, welches auf dem holographischen Film abgespeichert ist, folgt bei Überlagerung beider Wellen:

$$I \propto |S + R|^2 = |S|^2 + |R|^2 + S^*R + SR^*. \quad (1)$$

Nimmt die Transmission τ des Films linear mit der eingefallenden Lichtmenge ab, so gilt (mit a, b als Filmparameter):

$$\tau = a - b(|S + R|^2). \quad (2)$$

Wird der entwickelte Film nun mit der Referenzwelle beleuchtet, so erhält man hinter dem Film die Lichtverteilung $R\tau$, einsetzen von Gl. (1) und (2) liefert:

$$R\tau = R(a - b(|S + R|^2)) = R(a - b(|S|^2 + |R|^2 + S^*R + SR^*)) \quad (3)$$

Entscheidend ist der Term $RR^*S = |R|^2S$ – da $|R|^2$ nur einen konstanten Faktor liefert, wird die Signalwelle S mit der Phaseninformation vollständig rekonstruiert. Bei dieser Betrachtung wurde ein absorbierendes Aufzeichnungsmaterial zugrunde gelegt – das entstehende Hologramm wird auch als *Amplitudenhologramm* bezeichnet, da beim Lesen die Beugung durch eine räumliche Modulation der Amplitude der Lichtwelle hervorgerufen wird. Eine andere Möglichkeit, Hologramme zu erstellen und die in diesem Versuch verwendet wird, sind die *Phasenhologramme*, die dadurch ausgezeichnet sind, daß Veränderungen im Brechungsindex von transparenten Materialien bei der Belichtung zu einer Aufzeichnung führen. Ebenfalls fallen unter diese Kategorie Aufzeichnungen, die über die Änderungen der Filmdicke arbeiten (vgl. [BS03],[Dem06]).

Allen Techniken ist gleich, daß für die Erstellung – bis auf bei den computergenerierten Hologrammen, die über ein Druckverfahren erzeugt werden – ausreichen räumliche und zeitliche kohärente Lichtquellen vonnöten sind. Ebenfalls ist bei der Belichtung eine möglichst große Vibrationsfreiheit notwendig, da bereits Vibrationen, die kleiner als die Wellenlänge des verwendeten Lichts sind, das Interferenzmuster beeinflussen und Störungen hervorrufen. Da es bei der Rekonstruktion nur auf die Beugung ankommt, ist für das Auslesen von Hologrammen keine kohärente Lichtquelle notwendig – bei der Betrachtung in weißem Licht erscheinen die Hologramme, je nach Blickwinkel, in unterschiedlichen Farben. 3D-Echtfarben-Hologramme können erzeugt werden, indem auf dem selben Aufzeichnungsmaterial Hologramme mit roten, grünen und blauen Lasern geschrieben werden.

Eine weitere Klassifizierung von Hologrammen wird über die verwendete Filmdicke durchgeführt. Ist die Aufzeichnungsschicht in der Lichtwellenlängengrößenordnung, so wird von *dünnen Hologrammen* gesprochen. Von *dicken Hologrammen* oder *Volumenhologrammen*, die in diesem Versuch erstellt werden, wird gesprochen, wenn die Filmdicke wesentlich größer als die Lichtwellenlänge ist. Bei Volumenhologrammen gibt es für die Rekonstruktion der Signalwelle die zusätzliche Bedingung, daß die BRAGG-Bedingung erfüllt sein muß. Die BRAGG-Bedingung besagt, daß nur konstruktive Interferenz vorliegt, wenn die Beziehung

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (4)$$

erfüllt ist, wobei d den Abstand zwischen den Gitterebenen, θ den Winkel zwischen Strahl und Gitterebene und n die Beugungsordnung angibt (siehe Abb. 1).

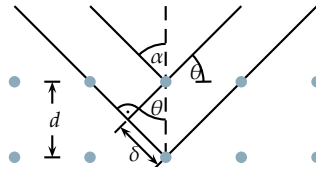


Abbildung 1: Bragg-Bedingung

Im Fall der konstruktiven Interferenz gelten dann die Beziehungen:

$$2\delta = n\lambda \quad ; \quad \delta = d \sin \theta \quad ; \quad \theta = 90^\circ - \alpha \quad (5)$$

Wird ein solches Hologramm mit Weißlicht beleuchtet, so wählt das Bragg-Gitter aus dem Weißlicht die passende Wellenlänge heraus, um die ursprüngliche Signalwelle zu rekonstruieren.

3. Versuchsaufbau und -beschreibung

3.1 Holographischer Film

Neben den in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen optischen Aufbauten für die Erstellung von Hologrammen wird für die Holographie-Erstellung besonderes Filmmaterial benötigt. Filmmaterial für normale Photographie liefert nicht das benötigte Auflösungsvermögen – etwa 200 bis 400 Linienpaare pro Millimeter im Gegensatz zu bis zu 6000 Paaren bei holographischen Filmmaterial – durch das höhere Auflösungsvermögen wird jedoch auch eine längere Belichtungszeit im Sekundenbereich benötigt. Das höhere Auflösungsvermögen wird aufgrund der entstehenden Interferenzmuster benötigt, da hiermit Details im Bereich von $0,1 \mu\text{m}$ bis $1 \mu\text{m}$ abgebildet werden können. In diesem Versuch wurden Filme der Firma Geola (PFG-01) eingesetzt, die aus einer Glasplatte mit den Abmessungen $63 \text{ mm} \times 63 \text{ mm} \times 2,7 \text{ mm}$ besteht, auf der einseitig eine feinkörnige Silberhalogenid-Emulsion (Korngröße durchschnittlich 40 nm , entspricht einem Auflösungsvermögen von 3000 Linienpaaren) der Dicke $7 \mu\text{m}$ als optisch aktive Schicht aufgebracht ist. Die Emulsion ist für die Erzeugung von transmittiven und reflektiven Hologrammen geeignet und ist im Wellenlängenbereich $600 - 380 \text{ nm}$ besonders sensitiv (vgl. [Möl07]).

Wird der Film belichtet, entsteht auf dem Film durch die Überlagerung der Referenz- und Objektwellen ein Interferenzmuster. Bei der in diesem Versuch verwendeten harten Entwicklung, d. h. für ein hohes Kontrastverhältnis werden die Grautöne unterdrückt, scheiden durch den Entwickler die Silberhalogenid-Moleküle Silberatome ab, die zu einer Schwärzung führen – die Schwärzung bzw. die Anzahl der abgeschiedenen Silberatome ist proportional zur Belichtungsintensität. Durch die anschließende Bleichung des Films werden die geschwärzten Filmbereiche chemisch so verändert, daß sie transparent werden – differieren jedoch die Brechungsindizes der belichteten und unbelichteten Bereiche. Durch die Strukturierung der Filmemulsion können Schlieren auftreten, die die Aufnahme jedoch nicht stören. Da beim Entwicklungsprozeß die Emulsion durch den Entwickler expandiert und durch die Bleiche kontrahiert, ist bei der Betrachtung der Hologramme eine Farbverschiebung – bei diesem Versuch bei der Verwendung eines roten $632,8 \text{ nm}$ -Lasers ins Grüne – zu beobachten.

3.2 Vorbereitende Arbeiten

Vor den eigentlichen Aufbauten der Versuchsanordnungen sollen HeNe-Laser, Seismograph, Oszilloskop und Trockenschrank eingeschaltet werden und die Statuslampen der letzten beiden abgedeckt werden. Die Helligkeit der Oszilloskopanzeige wird soweit heruntergeregelt,

daß das Signal gerade noch zu erkennen ist. Um bei den Aufnahmen Erschütterungen zu vermeiden, werden die Flurtüren mit Bleiziegeln fixiert.

Bei Bedarf müssen der Zwei-Komponenten-Entwickler und das Bleichmittel neu angesetzt werden, was bei uns der Fall gewesen ist. Entwickler und Bleichmittel wurden entsprechend der ausliegenden Inhaltsauflistung angesetzt, für die Abwägung der einzelnen Chemikalien stehen eine Waage sowie verschiedene Spatel und Gefäße zur Verfügung. Es ist beim Ansetzen der Entwicklerkomponenten und Bleichmittel darauf zu achten, daß sich alle Chemikalien vollständig im Wasser gelöst haben. Die einzelnen Komponenten des Entwickler werden zunächst getrennt angesetzt und erst kurz vor der Verwendung in das Gefäß zusammengeführt – überschüssiger Entwickler kann über den Abschluß entsorgt werden, wobei viel Wasser nachgespült werden soll. Das Bleichmittel wird in das andere vorbereitete Gefäß gebracht – Überschüsse werden in den bereitgestellten Kanister entsorgt. Beide Lösungen sind lichtempfindlich, daher müssen beide Gefäße direkt mit den vorhandenen Deckeln abgedeckt werden. Zusätzlich wird für die Wässerung ein Wasserbad mit fließendem Wasser sowie ein Wasserbad mit etwas Spülmittel bereitgestellt. Da die ersten Arbeiten für die Hologrammerstellung in vollkommender Dunkelheit durchgeführt werden müssen, sollte eine sinnvolle Anordnung der einzelnen Bäder vorgenommen werden und störende Gegenstände aus dem Arbeitsbereich entfernt werden.

Da hier mit gesundheitsgefährdenden Chemikalien gearbeitet werden muß, sind für den Schutz vor Hautkontakt die Latex-Handschuhe zu verwenden – weitere Schutzmaßnahmen (Brille, Kittel, . . .) waren leider nicht vorhanden.

3.3 Versuchsaufbau und Justage

Bei allen Versuchsteilen und Justagen muß darauf geachtet werden, daß man beim Arbeiten nicht direkt in den Laser schaut, um Augenverletzung zu vermeiden. Insbesondere wird beim Hohlspiegel der Strahl noch einmal gebündelt und kann zu schwereren Augenverletzungen führen.

Der verwendete HeNe-Laser ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) hat eine Kohärenzlänge von 20 – 30 cm und einen Strahldurchmesser von 2 – 3 mm. Um eine gleichmäßige Ausleuchtung zu erreichen, wird er daher mit einem Raumfilter (Sammellinse und Blende) aufgeweitet. Die Sammellinse fokussiert das vom Laser emittierte parallele Licht in den Brennpunkt, hinter dem Brennpunkt laufen die Strahlen weiter auseinander und erfassen einen großen Raumbereich. Durch kleine Mängel der Linse (Unreinheiten in der Linse, Staub, . . .) entstehen im aufgeweiteten Strahl Inhomogenitäten – um diese weitmöglichst zu unterdrücken wird die Blende (Durchmesser 20 – 30 μm) genau in den Brennpunkt der Sammellinse eingebracht und erreicht damit eine homogene Ausleuchtung der Objekte. Die zusätzliche Iris-Blende (elektronisch gesteuert) direkt vor dem Laser dient für die Einstellung der Belichtungszeit und sollte, um Streulicht möglichst zu vermeiden, direkt vor den Laser positioniert werden.

3.4 Herstellen von Hologrammen

Vor der Durchführung werden die einzelnen Aufgaben zwischen den beiden Versuchsteilnehmern aufgeteilt – einer ist für die Belichtung und Zeitmessungen, der andere für den Transport des Films zu den einzelnen Verarbeitungsstationen zuständig. Bis sich der Film im Bleichmittel befindet, müssen alle Arbeiten in Dunkelheit durchgeführt werden – daher sollte auch die Bedienung des Timers im Vornherein verstanden worden sein (ist der Timer in Betrieb, blinkt eine kleine grüne LED). Das Herstellen von Hologrammen wird, nachdem alle Vorbereitungen getroffen sind, über den folgenden Ablauf durchgeführt:

- Der Film wird aus der Aufbewahrungsbox entnommen und mit der lichtempfindlichen Seite in den Halter eingebracht. Erkennbar ist diese Seite, indem der Film an einer Ecke kurz mit den Lippen berührt wird – die klebrige Seite ist die lichtempfindliche Seite.
- Wenn sich beide Experimentatoren hingesetzt haben, um möglichst wenig Vibrationen zu verursachen, kann anhand des Seismographausschlags am Oszilloskop entschieden werden, wann die Belichtung (gesteuert über den Schaltkasten, der mit der Iris-Blende verbunden ist) gestartet werden soll – standardmäßig sind 4 s eingestellt.
- Nach der Belichtung wird der Film in den Entwickler verbracht und für 3 min entwickelt. Anschließend wird die Entwicklung durch ein zweiminütiges Wasserbad gestoppt.
- Ist der Film in das Bleichbad überführt worden, kann die Beleuchtung wieder eingeschaltet werden. Nach dem fünfminütigen Bleichbad wird der Film entnommen – ist der Film noch nicht vollständig transparent, muß noch weiter gebleicht werden. Die genaue Bleichzeit ist festzuhalten, eine Maximalzeit von 15 min sollte aber nicht überschritten werden. Nach dem Bleichen wird der Film für fünf Minuten in das Wasserbad verbracht.
- Nach dem Wasserbad wird der Film kurz mit dem Spülmittelwasser benetzt, damit beim Trocknen keine Wasserflecken entstehen, anschließend abgeschüttelt und auf einer Halterung in den Trockenschrank verbracht. Die Trocknung dauert mindestens fünf Minuten.

Während Entwicklung und Bleichen ist die Box leicht zu schwenken, bei der Wässerung der Rahmen, in dem der Film eingebracht wurde. Alle Zeiten sind sowohl in das ausliegende Laborbuch, wie auch in das Protokoll aufzunehmen.

3.5 Erstellung von holographischen Hohlspiegeln

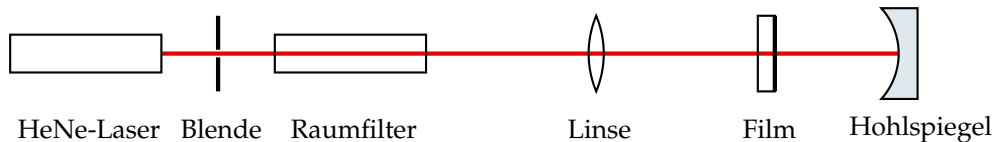


Abbildung 2: Versuchsaufbau für die Erstellung eines holographischen Hohlspiegels

Zusätzlich zum Raumfilter wird eine Linse in den Strahlengang eingebracht, damit das Hologramm eines Hohlspiegels aufgenommen werden kann. Da für die Erstellung paralleles Licht benötigt wird, wird der Brennpunkt der Linse mit der Position der Blende in Deckung gebracht. Der Tisch mit Filmhalterung wird in den Strahlengang gebracht und der versilberte Hohlspiegel hinter der Filmhalterung gestellt. Der Abstand Hohlspiegel-Filmhalterung bestimmt nachher die Größe des Hologramms, der Brennpunkt des Hohlspiegels sollte jedoch vor dem Film liegen (also links in Abb. 2). Der Abstand sowie die Brennweite des Hohlspiegels sollten notiert werden. Ist der Aufbau entsprechend justiert und gut ausgeleuchtet, kann mit der Erstellung des Hologramms wie in Abschnitt 3.4 beschrieben begonnen werden.

3.6 Erstellung von holographischen Gittern

Wie bei der Erstellung des holographischen Hohlspiegels wird auch hier die Linse für die Bereitstellung von parallelisiertem Licht benötigt. Der Objektisch wird aus der Anordnung entfernt und durch die Spiegelanordnung ersetzt. Der Winkel einer der beiden Spiegel (siehe Abb. 3) ist variabel, der feste Spiegel hat einen Neigungswinkel von 45° zum Strahlengang. Die Ausleuchtung kann mit Hilfe eines defekten Films überprüft werden, die Überlagerung der von beiden Spiegeln stammenden Strahlen ist gut sichtbar – diese sollte möglichst so eingestellt

werden, das sich beide Teile möglichst gut überdecken. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben wird dann das Hologramm erstellt – der Film muß dabei so in die Spiegelanordnung eingebracht werden, daß die beschichtete Seite nach unten zeigt.

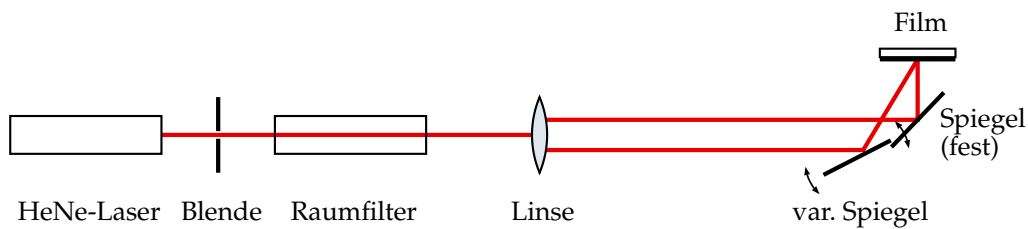


Abbildung 3: Versuchsaufbau für die Erstellung von holographischen Gittern

3.7 Erstellung von Objekt-Hologrammen

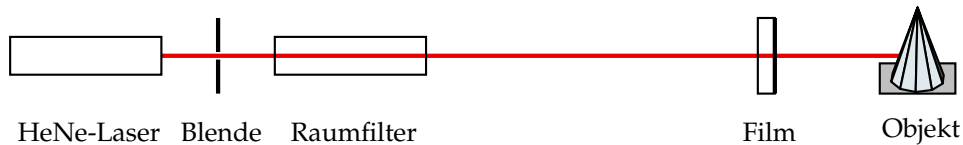


Abbildung 4: Versuchsaufbau für die Erstellung von Objekt-Hologrammen

Für die Erstellung von Objekt-Hologrammen werden Linse und Spiegelanordnung aus dem Strahlengang entfernt und dafür wieder der Objektstisch mit Filmhalterung in den Strahlengang eingebracht (Abb. 4). Das zu holographierende Objekt wird hinter der Filmhalterung gestellt und so positioniert, daß dieses gut ausgeleuchtet ist. Anschließend kann mit der Hologrammherstellung (Abschnitt 3.4) begonnen werden, die lichtempfindliche Seite des Films muß dabei zum Objekt hin zeigen.

4. Versuchsaufgaben

4.1 Aufgabe 1: Holographischer Hohlspiegel

Der Versuchsaufbau wurde wie in Abschnitt 3.5 aufgebaut, der Abstand zwischen Hohlspiegel und Film betrug dabei ≈ 5 mm. Laut Angabe am Hohlspiegel hatte dieser eine Brennweite von 50,8 mm. Für die Hologramm-Erstellung wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Zeiten benötigt.

| | |
|-------------------|-------------------------------|
| Belichtungszeit: | 4 s |
| Entwicklungszeit: | 3 min |
| Wasserbad: | 2 min |
| Bleichen: | 5 min + 1 min + 1 min = 7 min |
| Wasserbad: | 5 min |
| Trocknung: | 5 min + 15 min = 20 min |

Tabelle 1: Holographischer Hohlspiegel

Das entwickelte Hologramm zeigt eine ungleichmäßige Ausleuchtung bei der Belichtung – vermutlich wurde bei der Justierung eine der Schrauben für die Raumfilterjustage nicht fest genug angezogen, so daß sich durch Erschütterungen im Raum die Ausrichtung leicht verändert hat. Die ungleichmäßige Ausleuchtung führte aber nicht zu einer sichtbaren Beeinträchtigung der Eigenschaften des holographischen Hohlspiegels. Bei Betrachtung des Hohlspiegels fällt auf, daß bei Betrachtung mit der Filmseite zu einem hingerrichtet, dies einem normalen Hohlspiegel gleicht. Dreht man den Hohlspiegel so, daß nun die Glasseite zu einem hingerrichtet ist, sieht man sich jedoch vergrößert (wie bei einem Konkav-Spiegel) – mit einem Unterschied, das Bild steht auf dem Kopf. Eine andere Besonderheit des holographischen Hohlspiegels ist noch, daß es mehrere Brennpunkte gibt. Betrachtet man den Hohlspiegel mit der Halogenlampe, so sieht man deutlich die verschiedenen Brennpunkte, die sich auf der Mittelachse durch den Hohlspiegel aufreihen – dies kann man von *beiden* Seiten aus beobachten! Insgesamt wurde die Qualität des erstellten holographischen Hohlspiegels mit *gut* bewertet.

Um die Brennpunkte zu bestimmen, wird der Tisch aus dem Strahlengang entfernt und der holographische Hohlspiegel in die einfache Filmhalterung eingesetzt – zunächst mit der Glasplatte zum Laser. Eine Halterung mit einem kleiner Streifen lichtdurchlässigen Papier wird auf die optische Bank gesetzt, diese dient zur Auffindung der Brennpunkte. Vor und hinter dem Spiegel konnten jeweils nur zwei Brennpunkte gefunden werden und wurden mit einem Gliedermaßstab ($\Delta x = 1 \text{ mm}$) ausgemessen. Vor dem Hohlspiegel konnten die beiden Brennpunkte bestimmt werden zu $f_{v1} = 15,5 \text{ mm}$ und $f_{v2} = 39,0 \text{ mm}$, hinter dem Spiegel zu $f_{h1} = 15,5 \text{ mm}$ und $f_{h2} = 42,0 \text{ mm}$. Erkennbar ist, daß auf beiden Seiten die Brennweiten für die Brennpunktordnung annähernd identisch ist. Im Unterschied zum realen Hohlspiegel besitzt der holographische Hohlspiegel auf beiden Seiten reale multiple Brennpunkte. Vermuten könnte man, daß die Brennweiten des holographischen Hohlspiegels mit der Brennweite des realen Hohlspiegels in der Form zusammenhängt, das der holographische zwei Brennpunkte hat, einmal mit derselben Brennweite wie der reale Spiegel (abzüglich der Entfernung Spiegel-Film), einmal mit der halben Brennweite – und dies jeweils auf beiden Seiten. Die hier bestimmten kürzeren Brennweiten könnten mit der Expansion und Schrumpfung des Films beim Entwicklungsprozeß zusammenhängen, so daß die Struktur soweit verändert wird, daß sich die Brennweiten des holographischen Spiegels verändern.

4.2 Aufgabe 2: Holographisches Gitter

Um das holographische Gitter zu erstellen, wurde der Versuchsaufbau gemäß der Beschreibung in Abschnitt 3.6 umgebaut. Die jeweiligen Zeiten für die Hologramm-Erstellung sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

| | |
|-------------------|-----------------------|
| Belichtungszeit: | 4 s |
| Entwicklungszeit: | 3 min |
| Wasserbad: | 2 min |
| Bleichen: | 5 min + 2 min = 7 min |
| Wasserbad: | 5 min |
| Trocknung: | 20 min |

Tabelle 2: Aufgabe 2: Holographisches Gitter

Nach der Trocknung zeigte sich, daß das holographische Gitter doch ziemliche Mängel aufweist. Zu sehen waren Schlieren und ein Kratzer, auf einer Hälfte war auch die feine, sichtbare Gitterstruktur von einer gröberen, unruhigen Gitterstruktur überlagert. Ursächlich für die beiden letzt genannten Mängel könnte vielleicht die Entnahme des unbelichteten Films aus der Lagerkiste sein, da es hier ziemliche Probleme gab, die Lagerkiste mit einer Hand wieder lichtdicht zu verschließen, während man in der anderen Hand den entnommenen Film festgehalten hat. Daher wurde für die Qualität des Gitters nur ein *befriedigend* gegeben.

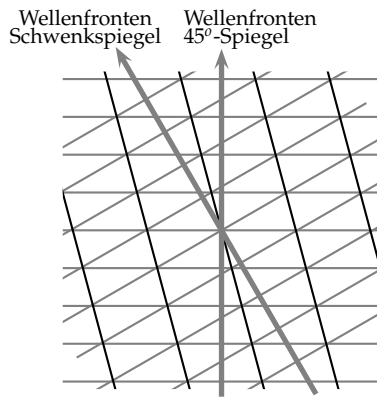


Abbildung 5: Entstehung der Gitterstriche

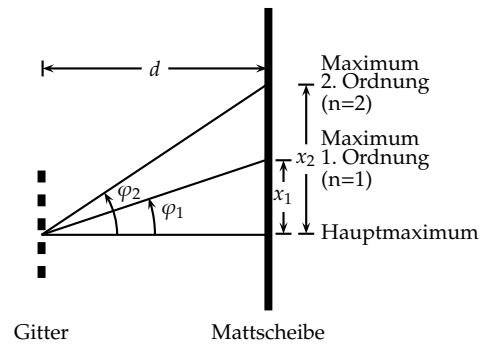


Abbildung 6: Beugung am Gitter

Um die optischen Eigenschaften, speziell die Gitterkonstante, des holographischen Gitters zu eruieren, wird aus dem Versuchsaufbau der Raumfilter und Linse aus dem Strahlengang entfernt und das Hologramm in den Halter gesetzt. Hinter dem Gitter wird die Mattscheibe mit angebrachtem Millimeterpapier eingebracht. Man messe nun den Abstand zwischen Gitter und Mattscheibe (mit dem Gliedermaßstab, $\Delta l = 1 \text{ mm}$) sowie die Abstände zwischen Hauptmaximum und Maxima n -ter Ordnung. Bei dem von uns erstellten Gitter konnte nur das Maxima 1-ter Ordnung (horizontal) beobachtet werden. Wurde das Gitter um 90° gedreht, so traten die Maxima in vertikaler Richtung auf. Hierbei wurden jedoch zusätzliche Punkte sichtbar, die wahrscheinlich durch die oben angesprochenen Mängel entstehen, da sich diese Punkte verschieben oder verschwinden, wenn man das Gitter in vertikaler Richtung verschiebt. In horizontaler Anordnung wurden jeweils die Abstände zu beiden Maxima 1. Ordnung aufgenommen, in vertikaler Anordnung konnte aufgrund des Aufbaus nur das obere Maxima 1. Ordnung vermessen werden. Mit der Wellenlänge λ des Lasers, dem Abstand vom holographischen Gitter zur Mattscheibe d und dem Abstand von Hauptmaximum zum Maximum n -ter Ordnung x_n gilt für die Gitterkonstante g (siehe auch Abb. 6):

$$g \sin \varphi_n = n\lambda \quad (6a)$$

$$\tan \varphi_n = \frac{x_n}{d} \quad (6b)$$

$$\Rightarrow g = \frac{n\lambda}{\sin \varphi_n} = \frac{n\lambda}{\sin(\arctan \frac{x_n}{d})} \quad (6c)$$

Die gemessenen Abstände und die daraus bestimmten Gitterkonstanten sind in Tabelle 3 wiedergegeben (Wellenlänge des Helium-Neon-Lasers: $\lambda = 632,8 \text{ nm}$).

| n | x_n / cm | d / cm | Bemerkung | $g / \mu\text{m}$ |
|-----|-------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| 1 | 13,75 | 22,6 | horizontal, links | 1,217 |
| 1 | 13,80 | 22,6 | horizontal, rechts | 1,214 |
| 1 | 6,60 | 10,9 | vertikal, oben | 1,222 |

Tabelle 3: Meßwerte Aufgabe 2

Damit ergibt sich im Mittel $\bar{g} = 1,218 \mu\text{m}$ bzw. $\bar{g} = 821 \text{ L/mm}$. Da hier nur drei Werte vorliegen ist die Durchführung einer Fehlerrechnung nicht sinnvoll. Der Fehler bei Mittelwerten, die mit weniger als 10 Elementen gebildet wurden, kann abgeschätzt werden über:

$$\Delta \bar{x} = \max_{i \in I} \{x_i - \bar{x}\} \quad (7)$$

und man erhält: $\Delta \bar{g} = 0,004 \mu\text{m}$. Als Gitterkonstante für das erstellte holographische Gitter

dann somit angegeben werden:

$$g = (1,218 \pm 0,004) \mu\text{m} = 1,218(1 \pm 0,3\%) \mu\text{m}$$

bzw.

$$g = (821 \pm 3) \frac{\text{L}}{\text{mm}} = 821(1 \pm 0,4\%) \frac{\text{L}}{\text{mm}}.$$

4.3 Aufgabe 3: Objekt-Holographie

In diesem Aufgabenteil sollten zwei Hologramme von verschiedenen Objekten gemäß der Beschreibung in Abschnitt 3.7 erstellt werden. Als erstes Objekt wurde ein weißer Drache ausgewählt, für das zweite Objekt-Hologramm wurden zwei helle Schachfiguren (Dame und Pferd) ausgewählt. Die jeweiligen Zeiten für die Hologramm-Erstellung sind in Tabelle 4 aufgeführt.

| | Drache | Dame und Pferd |
|-------------------|--------|----------------|
| Belichtungszeit: | 4 s | 4 s |
| Entwicklungszeit: | 3 min | 3 min |
| Wasserbad: | 2 min | 2 min |
| Bleichen: | 5 min | 5 min |
| Wasserbad: | 5 min | 5 min |
| Trocknung: | 20 min | 30 min |

Tabelle 4: Aufgabe 3: Objekt-Holographie

Beide Objekt-Hologramme sind sehr gut zu erkennen, selbst kleine Details der Ursprungsfiguren sind im Hologramm dargestellt. Beim zweiten Objekt-Hologramm, Dame und Pferd, wurden beide Figuren in unterschiedlichem Abstand zum Film angeordnet. Diese räumliche Anordnung ist im Hologramm ebenfalls zu erkennen und bei leichtem Kippen des Hologramm erhält man den Eindruck, als wenn man um die Figuren herumgeht und kann diese auch – in gewissen Grenzen – von der Seite betrachten. Beide Objekt-Hologramme zeigen einen leichten Grünstich – dieser wird durch die Entwicklung und Bleichung hervorgerufen. Betrachtet man die Hologramme von der Seite mit der Filmbeschichtung, so sind die Objekte vergrößert – auch muß der Abstand zwischen Hologramm und Betrachter verhältnismäßig groß sein, um die Objekte gut betrachten zu können. Bei Betrachtung der anderen Seite (Glasseite), ist auch ein kleinerer Abstand möglich – die Objekte erscheinen kleiner als bei der vorherigen Betrachtungsweise. Auffallend ist auch, daß die Objektgröße mit dem Abstand der Betrachtungslichtquelle zusammenhängt, ist diese weiter entfernt, so erscheinen die Objekte größer. Die Qualität beider erstellter Hologramme kann insgesamt als *sehr gut* bezeichnet werden.

5. Fazit

Das Erstellen von Hologrammen erfordert von den Experimentatoren ein hohes Maß an Feinarbeit was die richtige Justierung des Aufbaus anbelangt, da dies ein wesentlichen Einfluß auf die Qualität der erstellten Hologramme besitzt. Auch die Arbeit in völliger Dunkelheit erfordert eine gute Arbeitsorganisation und Absprache zwischen den Teilnehmern, die in dieser Form bei den anderen Versuchen nicht zwingend notwendig ist. Insgesamt gibt dieser Versuch einen guten Einblick in die Arbeitsmethodik, auch über Fachgrenzen hinweg (Umgang und Mischen von Chemikalien). Besonders hervorzuheben ist bei diesem Versuch die Möglichkeit, das erstellte Objekt auch im nachhinein noch zu betrachten.

6. Verwendete Geräte

- HeNe-Laser ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$)
- Iris-Blende mit elektronischer Steuerung
- Raumfilter (Sammellinse und Blende)
- Sammellinse
- Spiegelanordnung
- Objektisch mit Filmhalterung
- Hohlspiegel ($f = 50,8 \text{ mm}$)
- Optische Bank, Mattscheibe, Filmhalterung, Halterung mit lichtdurchlässigen Papier
- elektronischer Timer
- Seismograph und Oszilloskop
- Waage, Spatel, chemisches Laborzubehör
- zwei Boxen für Entwickler und Bleiche, Schalen für Wasserbäder
- Trockenofen

Literatur

- [BS03] BUSE, Karsten ; SOERGEL, Elisabeth: Holographie in Wissenschaft und Technik – Sicherheitsmerkmale und Datenspeicher sind nur zwei der vielfältigen Anwendungen von Hologrammen. In: *Physik Journal* 2. Jahrgang (2003), Nr. 3, S. 37 – 43
- [Dem06] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik*. Bd. 2: *Elektrizität und Optik*. 4. Auflage. Berlin – Heidelberg – New York : Springer, 2006. – ISBN 3–540–33794–6
- [Mö107] MÖLLER, Ivonne: *104 - Holografie*. Vorläufige Fassung. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Physik und Astronomie, Nov. 2007

Liste der Versionen

| Version | Datum | Bearbeiter | Bemerkung |
|---------|------------|------------|----------------------|
| 0.9 | 11.03.2008 | Kob/Krä | Versuchsdurchführung |
| 1.0 | 24.03.2008 | Kob/Krä | Versuchsauswertung |
| 1.1 | 20.04.2008 | Krä | Korrektur |