

# **Physik-Praktikum:HOL**

## **Einleitung**

Verfahren, um Bilder dreidimensional darzustellen, gibt es viele. Es sind aber vermutlich größtenteils stereographische Verfahren, die ein aus zwei Perspektiven aufgenommenes Bild an je ein Auge weiterleiten; z.B. durch Polarisierung des Lichts (Polarisationsbrille, wie im IMAX), durch Rot-Grün-Farbfiler (gelegentlich im TV benutzt), durch Brillen o.ä. mit Umlenkprismen (wie in einem Gang an der TU im Gebäude 7 Stammgelände), durch Linsenrasterfolien (manchmal bei Postkarten zu sehen), durch sehr geringen Augenabstand und nicht auf einen Punkt ausgerichteten Augen („Das magische Auge“) oder ähnliche Verfahren kann man dies realisieren. Die Holografie ist hier eine Ausnahme, weil erstens das Bild nicht nur aus zwei bzw. wenigen (bei Linsenrasterfolien möglich) zweidimensionalen Bildern, die entsprechend nur eine oder wenige Perspektiven bieten, zusammengesetzt ist, sondern aus sehr vielen Perspektiven aufgenommen ist, und zweitens, weil die Bildreproduktion mit der normalen Fotografie, Druck, Zeichnung etc. nichts zu tun hat, sondern ein völlig eigenständiges Verfahren ist.

## **Versuchsaufbau und Durchführung**

### **Michelson-Interferometer**

Um die Empfindlichkeit der Apparatur gegenüber Störungen zu testen, wird zuerst ein Michelson-Interferometer aufgebaut, bei dem der Laserstrahl im Strahlteiler in zwei senkrecht aufeinander stehende Strahlen geteilt wird, die über Spiegel wieder aufeinander projiziert werden, so dass sie interferieren. Wichtig ist hierbei, dass die Spiegel möglichst parallel sind, damit es nicht durch verschiedene Weglängen des Lichts einen Gangunterschied gibt (d.h. das Interferenzmuster weist möglichst wenige Maxima und Minima auf, die Streifen sind größer), dadurch wird das Interferometer empfindlicher.

Ergebnis: Wenn man auf dem Fußboden stampft oder die Tür zuschlägt, macht sich das praktisch nicht bemerkbar. Lediglich Störungen auf dem Tisch (d.h. wenn man auf den Tisch klopft) machen sich bemerkbar, und auch Wärme (ändert den Brechungsindex der Luft).

Der Grund, warum man das Blatt Papier, das als Beobachtungsschirm dient, nicht zwischen den Glasplatten des Halters sondern davor befestigen soll, sind vermutlich störende Interferenzen zwischen Laserlicht, das vom Papier diffus gestreut und an der Glasplatte durch Totalreflexion wieder auf das Papier zurückgespiegelt wird, und den beiden einfallenden Laserstrahlen. (Ausprobiert haben wir das jedoch nicht.) Bei der Aufnahme des Hologramms spielt das keine Rolle, weil der Holografiefilm im Gegensatz zum Papier annähernd transparent ist und somit kaum Licht reflektiert.

### **Transmissionshologramm**

Bei der Herstellung des Transmissionshologramms vermuteten wir als größtes Problem eine zu geringe Lichtintensität des Objektstrahls. Daher bauten wir den Strahlengang (Länge ca. 65 cm) so auf, dass bei der Reflexion auf die Filmebene der Ein-/Ausfallswinkel möglichst gering ist und somit eine möglichst große Lichtmenge auf die Filmebene reflektiert wird, der das Objekt beleuchtende Strahl kam also von schräg hinter dem Filmhalter auf das Objekt (bei der ersten Aufnahme zwei Würfel, bei der zweiten eine Plastikfigur eines Ritters mit Armbrust). So erreichten wir eine relativ große Intensität des Objektstrahls, und zusammen mit dem sehr flach einfallenden Referenzstrahl ergab sich ein ausreichender Kontrast (20:70) auch ohne Graukeil im Referenzstrahl, und die beiden Aufnahmen wurden sehr gut. Die restlichen Parameter wählten wir wie in der Anleitung beschrieben.

Bei der Rekonstruktion machten wir folgende Beobachtungen: Das virtuelle Bild ist an der selben Stelle wie das Objekt (vom Beobachter aus gesehen hinter dem Hologrammfilm). Eine Rekonstruktion mit Weißlicht ist praktisch nicht möglich (nur mit der Halogenlampe kann man das Objekt schwach und sehr unscharf grünlich erkennen, unter normalem Umgebungslicht sieht man überhaupt nichts).

## **Denisyuk-Hologramm**

Das Denisyuk-Hologramm erstellen wir von den beiden Würfeln und einem Metall-Schlüssel, um ein diffus und ein metallisch reflektierendes Objekt zu haben. Der Abstand der Objekte zur Filmebene betrug wenige Millimeter.

Unter Weißlicht ist der Schlüssel sehr gut zu sehen, auch unter normalem Umgebungslicht. Unter der Halogenlampe kann man auch die Würfel erkennen, aber deutlich lichtschwächer. Die Farbe des Hologramms unter Weißlicht ist grün.

Unter Laserlicht war das Hologramm allerdings praktisch nicht zu erkennen.

## **Fragen**

### **Was ist der prinzipielle Unterschied zwischen Fotografie und Holographie?**

Fotografie benutzt Linsen, um auf dem Film ein Bild zu erzeugen; dabei wird ein Objektpunkt durch die Linse(n) auf (idealerweise) genau einen Bildpunkt abgebildet. Die Bildpunkte werden dabei analog zur Lichtintensität an diesem Punkt geschwärzt, d.h. die Amplitude wird an diesem Punkt festgehalten. Durch Verwendung von entsprechendem Filmmaterial können die Intensitäten von verschiedenen Wellenlängen festgehalten werden (d.h. die Farbe des Objekts wird registriert). Bei der Betrachtung des Bildes wird das auf das Bild fallende Licht durch die Schwärzung des Filmmaterials bei der Streuung z.T. absorbiert (d.h. die Amplitude der Lichtwelle verringert), man sieht also aus allen Betrachtungswinkeln und mit allen Beleuchtungswinkeln die Lichtintensität des betrachteten Bildpunkts gleich stark reduziert. Man kann das Bild also aus allen Richtungen und mit Beleuchtung aus allen Winkeln betrachten, und weil bei einem Farbfilm die verschiedenen Filmmaterialien an einem Bildpunkt je nach Farbe verschieden geschwärzt sind, werden entsprechend die verschiedenen Wellenlängen des einfallenden Lichts verschieden absorbiert, man sieht das Bild farbig.

Um Gegenstände dreidimensional abzubilden, registriert man bei der Holografie neben der Amplitude auch die Phase der einfallenden Lichtwelle (mit dieser Information kann die Lichtwelle wieder genau rekonstruiert werden). Weil hier bei der Rekonstruktion Interferenz benutzt wird, muss das Licht monochromatisch sein, man kann daher keine Farben aufzeichnen (Farbhologramme sind vermutlich „mehrere Hologramme in einem“, die einen viel aufwändigeren Aufbau mit u.a. mehreren Lasern erfordern – im Unterschied zu Farbfotos, die man sich zwar auch als „mehrere lichtempfindliche, auf verschiedene Farben ansprechende Schichten in einer“ vorstellen kann, bei denen aber nichts an der Kameralage geändert werden muss, lediglich das Filmmaterial ist anders).

### **Was ist der Unterschied zwischen Lichtstrahl und Lichtwelle?**

Als Lichtwelle bezeichnet man den Wellencharakter des Lichts, den man mit der Elektrodynamik (Maxwellgleichungen) beschreiben kann; die Lichtwelle ist eine elektromagnetische Welle mit Wellenlängen im Bereich zwischen ca. 400 und 700 nm.

Ein Lichtstrahl dagegen bezeichnet den makroskopischen Charakter des Lichts, den man mit den Grundaxiomen der geometrischen Optik beschreiben kann: ein Lichtstrahl verläuft immer geradlinig (in einem optisch homogenen Medium), sein Weg kann stets in beiden Richtungen durchlaufen werden, zwei Lichtstrahlen beeinflussen sich nicht gegenseitig, an der Grenzfläche zwischen zwei Medien wird er nach dem Reflexionsgesetz reflektiert und nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz gebrochen.

Ein Lichtstrahl ist also die Summe vieler Lichtwellen bzw. Photonen, er ist als die Normale auf der Phasenfläche definiert.

### **Was ist der Unterschied zwischen der Dicke eines Materials und der optischen Dicke dieses Materials dessen optischer Brechungsindex ist?**

Die optische Dicke ist die Strecke, die das Licht in der selben Zeit, die es zur Durchquerung des Mediums benötigt, im Vakuum zurücklegen würde:

$$n = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_{\text{Medium}}} = \frac{d_{\text{opt}}/t}{d/t} = \frac{d_{\text{opt}}}{d} \Rightarrow d_{\text{opt}} = n \cdot d ;$$

Weil die Lichtgeschwindigkeit im Medium mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit über den Brechungsindex zusammenhängt, gilt also: Die optische Dicke eines Materials ist das Produkt aus Dicke und Brechungsindex. Da der Brechungsindex eines Mediums größer als 1 ist, ist entsprechend die optische Dicke größer als seine Dicke.

Den Gangunterschied, der bei Phasenhologrammen die Interferenz hervorruft, kann man somit als Differenz der verschiedenen optische Dicken (wegen der durch das Bleichen verschiedenen Brechzahlen) des Filmmaterials deuten.

**WiemüßtederVersuchsaufbauinAbb.11modifiziertwerdenumeinDenisyuk-HologrammdurchInterferenzzweierebenerWellenherzustellen?DieDickederlichtempfindlichenEmulsiondesverwendetenFilmmaterialsbeträgetwa6µm.NachAbschn.3.1bestehtdiesesspezielleHologrammausparallelenSchichten.WievieleSchichtenbildensichinderEmulsionsschichtaus,wenndasHologrammmiteinemHe-Ne-Laserhergestellt wurde?**

Für die Interferenz ebener Wellen müssen die Lichtstrahlen parallel einfallen; dazu kann man z.B. eine Sammellinse (deren Brennpunkt sich im Brennpunkt der anderen Linse befindet) in den Strahlengang stellen (Strahlen, die auf der einen Seite der Linse parallel zur optischen Achse verlaufen, gehen auf der anderen Seite durch den Brennpunkt).

Nach der Praktikumsanleitung entstehen die Schichten im Abstand einer halben Wellenlänge (d.h. bei einem He-Ne-Lasers:  $632,8 \text{ nm} / 2 = 316,4 \text{ nm}$ ), d.h. bei einer Schichtdicke von  $6 \mu\text{m}$  passen knapp 19 Schichten (18,96....) in das Filmmaterial.

**Was passiert beim Zerschneiden eines Hologramms (was sieht man auf den Teilhologrammen)?**

Weil ein Hologramm wie ein optisches Gitter aufgebaut ist, kann man einem Objektpunkt nicht direkt einen Bildpunkt zuordnen, sondern jeder Bildpunkt speichert gewissermaßen (zusammen mit seinen Nachbarpunkten, die ein Gitter bilden) Informationen des gesamten Bildes, aufgenommen aus der Perspektive des Bildpunkts. Daher bleibt auch beim Zerschneiden das gesamte Bild erhalten, allerdings nicht alle Perspektiven – jede Hologrammhälfte zeigt die Perspektiven des Objekts, die bei der Aufnahme von den auf der Hälfte liegenden Punkten sichtbar war.

**Was ist zu erwarten, wenn man das Hologramm mit einer anderen Wellenlänge als bei der Aufnahme rekonstruiert?**

Wenn man sich ein Hologramm als optisches Gitter vorstellt, dann ergibt sich, dass bei einer „falschen“ Wellenlänge das Licht anders gebeugt wird und somit an anderen Stellen interferiert, d.h. das Hologrammbild wird skaliert. Daher sieht ein Hologramm bei Weißlicht unscharf aus, weil sich die Bilder der verschiedenen Wellenlängen nicht deckungsgleich überlagern.

**Gegenstands- und Referenzwelle, die sich entlang der Wellenvektoren  $\vec{k}_g$  bzw.  $\vec{k}_r$  ausbreiten, lauten in komplexer Schreibweise  $E_G = E_g e^{i(\omega t - \vec{k}_g \cdot \vec{r})}$  bzw.  $E_R = E_r e^{i(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})}$  (15) wobei  $|\vec{k}_g| = |\vec{k}_r| = \lambda / (2\pi)$ . Geben Sie dafür die der Gleichung (7) entsprechende Intensitätsverteilung im Hologramm an.**

**Die Intensität  $I = |E_G + E_R|^2 = (E_G + E_R)(E_G^* + E_R^*)$  (16).  $E^*$  ist die konjugiert komplexe Größe von  $E$ . Berechnen Sie das Wellenfeld  $E_B = E_b e^{i(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})}$  (17) am Hologramm. Sie erhalten einen Ausdruck analog zu Gl. (14), der aus drei Termen besteht, die verschiedene Wellen darstellen. Diskutieren Sie diese drei Wellen (Amplitude, Phase). In welche Richtungen laufen Sie, wenn  $\vec{k}_g$  um  $\pi/4$ ,  $\vec{k}_r$  um  $-\pi/4$  gegen die x-Achse geneigt sind? Skizzen fertigen.**

Intensitätsverteilung:

$$I = |E_G + E_R|^2 = (E_G + E_R)(E_G^* + E_R^*) = E_g^2 + E_r^2 + E_g E_r e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \vec{k}_g \cdot \vec{r})} + E_g E_r e^{-i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \vec{k}_g \cdot \vec{r})} = E_g^2 + E_r^2 + 2 \cdot E_g E_r \cos(\vec{r} \cdot (\vec{k}_r - \vec{k}_g))$$

Daraus resultierendes Wellenfeld:

$$E_D \propto I \cdot E_B = E_b e^{i(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})} \cdot (E_g^2 + E_r^2 + E_g E_r e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \vec{k}_g \cdot \vec{r})} + E_g E_r e^{-i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \vec{k}_g \cdot \vec{r})}) = E_b e^{i(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})} E_g^2 + E_b e^{i(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})} E_r^2 + E_b e^{i(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})} E_g E_r e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \vec{k}_g \cdot \vec{r})} + E_b e^{i(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})} E_g E_r e^{-i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \vec{k}_g \cdot \vec{r})} = (E_b E_g^2 + E_b E_r^2) \cdot e^{i(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})} + E_b E_g E_r e^{i(\omega t - \vec{k}_g \cdot \vec{r})} + E_b E_g E_r e^{i(\omega t - (2\vec{k}_r - \vec{k}_g) \cdot \vec{r})}$$

Der erste Summand stimmt bis auf die Amplitude mit der Rekonstruktionswelle überein. Der zweite Summand ist proportional zur Gegenstandswelle und erzeugt das virtuelle Bild. Dieses ist abgesehen von der veränderten Intensität vom Betrachter nicht mehr vom Original zu unterscheiden. Der dritte Term beschreibt das reelle Bild. Dieses befindet sich auf der vom Objekt abgewandten Seite des Films.

Die ersten beiden Summanden breiten sich in Richtung der ursprünglichen Referenz- bzw. Gegenstandswelle aus. Der dritte Summand entfernt sich unter einem Winkel von

$$\vartheta = \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{1}{2}\right)$$

von der x-Achse.

