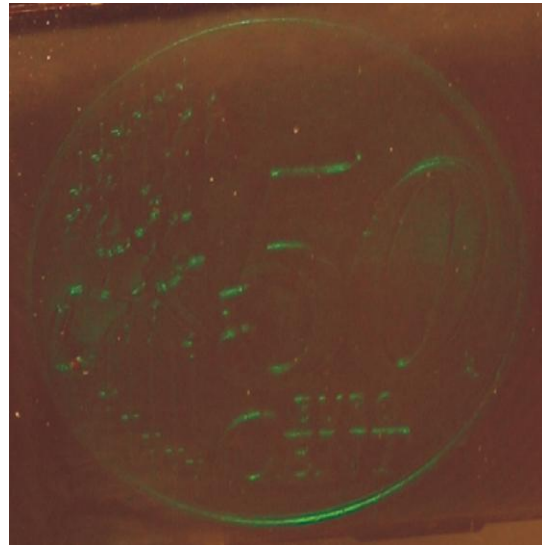
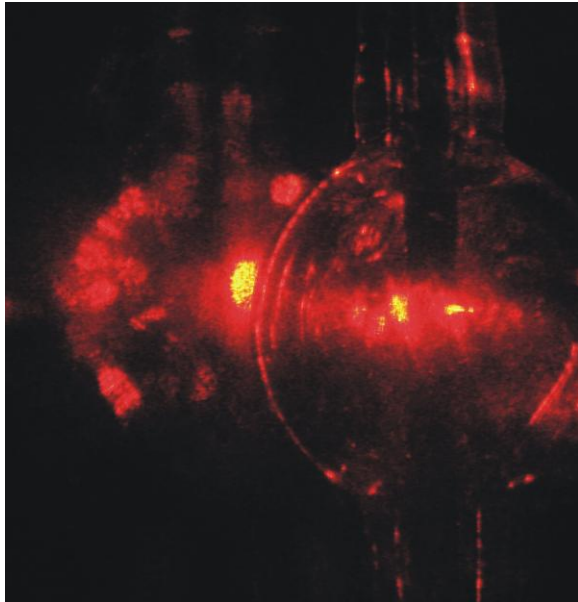
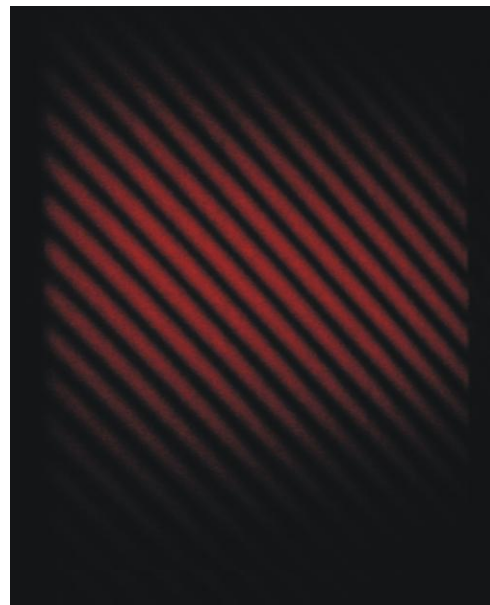


Holografie (HO)



Franziska Schröter, Maximilian Kölsch: Protokoll "Holografie" 2014



Holografie (HO)

Die Holografie ist ein Verfahren zur vollständigen Aufzeichnung von Wellenfronten, d. h. neben der Intensität wird auch die Phase des Lichtwellenfeldes gespeichert. Im Unterschied zur gewöhnlichen Fotografie bleibt daher bei der Rekonstruktion einer Objektwellenfront der räumliche Eindruck des Objekts erhalten. Zur Aufnahme eines Hologramms wird ein Laserstrahl in zwei kohärente Wellen aufgeteilt. Die Objektwelle wird vom aufzunehmenden Objekt beeinflusst (z.B. reflektiert) und mit der ungestörten Referenzwelle überlagert. Das entstehende Interferenzmuster wird dann als Hologramm z.B. auf einer Fotoplatte aufgezeichnet. Beleuchtet man die entwickelte Fotoplatte mit der Referenzwelle, so wird die ursprüngliche Objektwelle rekonstruiert.

Hologramme findet man nicht nur auf Kreditkarten oder im Unterhaltungsbereich, es werden auch auf holografischen Methoden beruhende messtechnische Verfahren weiterentwickelt.

Lernziele und Methoden

- Aufnahme und Rekonstruktion von Wellenfronten
- Eigenschaften von Laserlicht: Wellenlänge, Polarisierung, zeitliche und räumliche Kohärenz
- Fresnel-Zonenplatte
- Hologramminterferometrie

Experimentelle Technik

- Laser als kohärente Lichtquelle
- Linsen und Spiegel, mechanische Justiereinrichtungen
- Fotoplatten, Fotochemie
- Raumfilter

1. Grundlagen

Grundwissen: Bergmann, Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3 Optik, Walter de Gruyter Verlag; Kapitel 3 Interferenz und Beugung; insbesondere Kapitel 3.10 und 3.14 oder

E. Hecht: Optik, Oldenbourg, 2001

Literatur zur Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

W. Lauterborn, T. Kurz, M. Wiesenfeldt: Kohärente Optik, Springer-Verlag, 1993
Kapitel 7 Holographie
Kapitel 8 Holographische Interferometrie

J.I. Ostrowski: Holografie - Grundlagen, Experimente und Anwendungen, Harri Deutsch Verlag 1988

2. Aufgaben

Michelson-Interferometer

MA1: Aufbau eines Michelson-Interferometers; qualitative Beobachtung der mechanischen Stabilität des Versuchsaufbaus

MA2: Bestimmung der Kohärenzlänge des verwendeten Lasers

Transmissionshologramm mit transparenten Objekten

MA3: Aufnahme und Rekonstruktion dreidimensionaler Objekte mit einer sphärischen Referenzwelle

MA4: Mikroskopische Beobachtung der Interferenzstruktur des Hologramms

MA5: Fotografische Dokumentation des virtuellen Bildes in verschiedenen Bildebenen

Transmissionshologramm mit reflektierendem Objekt

MA6: Aufnahme und Rekonstruktion dreidimensionaler Objekte mit einer ebenen oder sphärischen Referenzwelle; fotografische Dokumentation des virtuellen Bildes

Hologramminterferometrie

MA7: Doppelbelichtung eines Prüfobjektes vor und nach einer simulierten Beanspruchung;
fotografische Dokumentation des Ergebnisses

Reflexionshologramm/ Volumenhologramm/ Weißlichthologramm

MA8: Herstellung eines Weißlichthogramms

Holografische Erzeugung eines Sinusgitters

MA9: Holografische Erzeugung eines Sinusgitters aus zwei ebenen Wellen, Bestimmung der
Gitterkonstante

3. Experimentelle Technik

Die Phaseninformationen des Objektes können nur durch interferentielle Überlagerung von Signalwelle (Objektwelle) und Referenzwelle auf der Fotoplatte gespeichert werden. Dazu werden zueinander kohärente Wellen benötigt, die im Versuch nur ein Laser als Lichtquelle liefern kann, dessen Strahl in zwei kohärente Teilstrahlen aufgeteilt werden muss. Dafür gibt es verschiedene Verfahren, die Wellenfrontteilung und die Amplitudenteilung.

Durch geeignete Maßnahmen muss der Laserstrahl zusätzlich so aufgeweitet werden, dass sein Durchmesser ausreicht, um größere Objekte und das Hologramm auszuleuchten. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten. Besonders interessant für diesen Versuch ist die Verwendung eines Raumfilters. Fokussiert man mit Hilfe eines Mikroobjektivs den Laserstrahl auf eine genau im Brennpunkt dieses Objektivs stehende Blende mit geringem Durchmesser ($D \sim 20 \mu\text{m}$; Pinhole), so ermöglicht die Nutzung der Nullten Ordnung der hinter dem Pinhole entstehenden Beugungsfigur die Erzeugung einer nahezu idealen Kugelwelle. Bei zusätzlicher Verwendung einer Linse mit größerer Brennweite und Öffnung, die ihren gegenstandseitigen Brennpunkt in der Pinhole-Ebene hat, kann kollimiertes Licht erzeugt werden. Wie Sie aus dem Versuch „Abbesche Theorie“ im Grundpraktikum bereits wissen, erzeugt eine Linse in ihrer Brennebene die Fouriertransformierte des einfallenden elektrischen Feldes, aus der Sie mittels Pinhole alle höheren Raumfrequenzen (und damit Störungen der Wellenfront z.B. durch Streuung an Staubteilchen) entfernen können. Deshalb bezeichnet man die Kombination von Mikroobjektiv mit einem Pinhole geeigneten Durchmessers auch als Raumfilter.

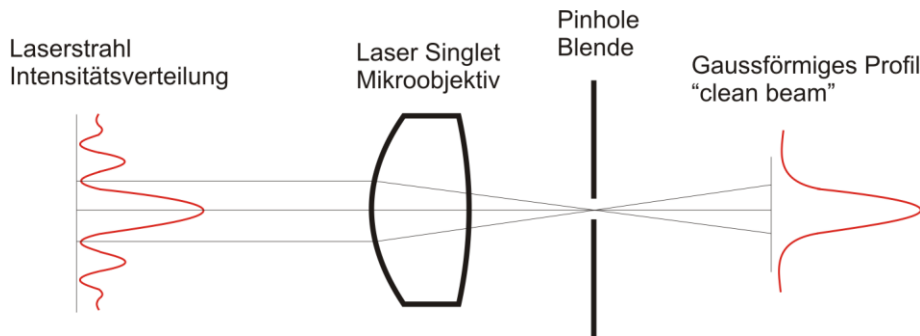


Bild 1: Funktionsweise eines Raumfilters

Den Spotdurchmesser des Laserstrahls im Fokus der Linse kann man abschätzen mit:

$$\sim 1,27 \lambda f / D \quad (\text{mit } \lambda \text{ Laserwellenlänge in } \mu\text{m}, f \text{ Brennweite der Linse in mm, } D \text{ Laser- Strahldurchmesser am Eingang})$$

Die Öffnung der Blende muss nun etwa 1,5 mal der Spotdurchmesser in μm sein.

Die optischen Anordnungen zur Erzeugung der Hologramme sehen Sie in Bild 2 und 3.

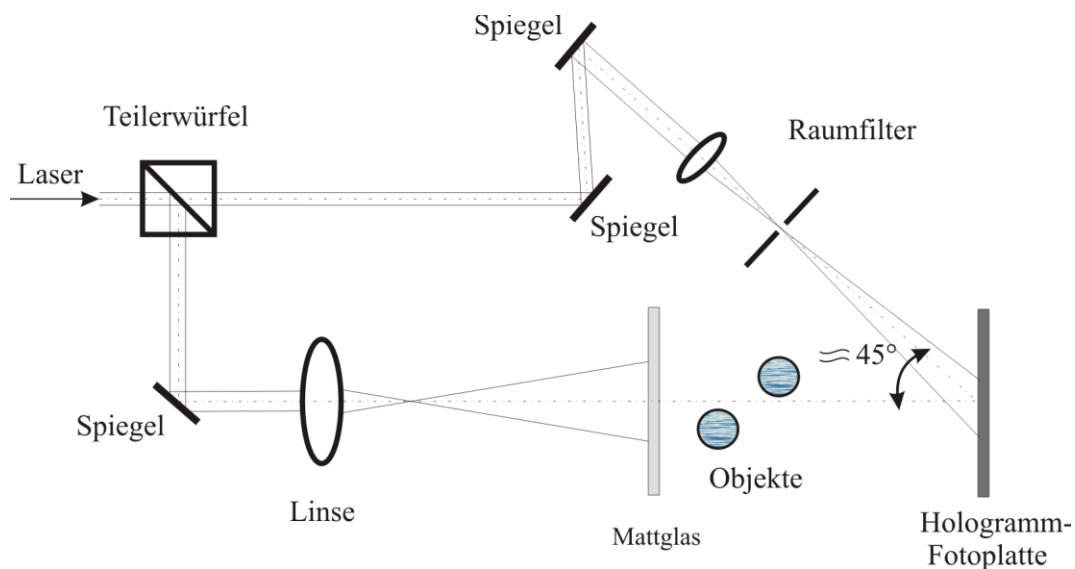


Bild 2: Anordnung zur Aufnahme eines Transmissions-Hologramms mit sphärischer Referenzwelle und transparenten Objekten

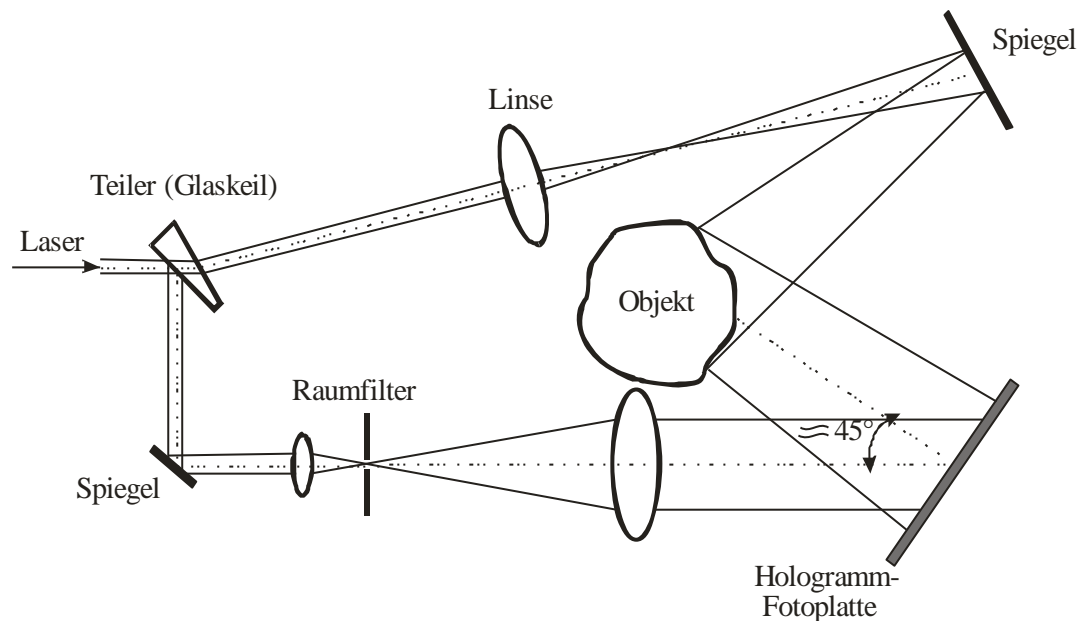


Bild 3: Anordnung zur Aufnahme eines Transmissions-Hologramms mit ebener Referenzwelle und diffus reflektierendem Objekt

4. Hinweise zur Versuchsdurchführung und Auswertung

Beachten sie beim Aufbau der experimentellen Anordnungen die von Ihnen zuvor ermittelte begrenzte Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle. Zur Bestimmung der Kohärenzlänge bauen Sie ein Michelson - Interferometer auf und verschieben Sie in einem der beiden Interferometerarme den Spiegel. Beobachten Sie die auftretenden Änderungen der Interferenzfigur und legen Sie fest, in welchem Bereich des Laufstreckenunterschieds zwischen Objektwelle und Referenzwelle Sie im Versuch bleiben wollen.

Bevor Sie holografisch ein Sinusgitter erzeugen, ermitteln Sie die voraussichtliche Gitterkonstante in Abhängigkeit des von Ihnen gewählten Winkels der beiden ebenen Wellen zueinander. Daraus ergibt sich die spätere Lage der Hauptmaxima des Beugungsgitters.

Anhand der Anzahl der dann auftretenden Beugungsordnungen können Sie feststellen, ob es sich um ein dickes oder ein dünnes Gitter handelt. Diese Feststellung ist wichtig bei der Entscheidung darüber, ob mit den verwendeten Fotoplaten überhaupt Volumenhologramme aufgenommen werden können.

Beim Aufbau der Versuchsanordnungen ist zu bedenken, dass Die Objektwelle durch hohe Reflexionsverluste am Objekt in der Regel geringere Intensität aufweist als die Referenzwelle. Deshalb muss die Intensität der beiden Wellen angepasst werden. Dazu steht Ihnen ein regelbares Graufilter zur Verfügung, das in der Regel im Referenzarm angeordnet wird, der Laser ist linear polarisiert.

Achtung: Am Ort der Fotoplatte interferieren nur die linear polarisierten Wellen gleicher Polarisationsrichtung. Zur Kontrolle der Intensitätsverhältnisse am Ort der Fotoplatte steht

Ihnen ein Selen-Photoelement zur Verfügung. Sinnvolle Intensitätsverhältnisse zwischen Objekt- und Referenzwelle liegen zwischen 4:1 und 6:1, mindestens aber 1:1.

Die Schwärzung des belichteten und entwickelten Hologramms muss im linearen Bereich der Schwärzungskurve der Fotoemulsion liegen. Die üblichen Belichtungszeiten können mit einer Faustregel aus dem Erfahrungsschatz des F-Praktikums ermittelt werden.

Die verwendeten Fotoplatten besitzen eine rotempfindliche Fotoemulsion. Die Fotoplatten müssen vor Licht absolut geschützt transportiert werden. Um sie in den perfekt vorbereiteten Versuchsaufbau einsetzen zu können, steht eine Dunkelkammerleuchte mit grünem Licht zur Verfügung. Einsetzen und Entnehmen der Fotoplatte, sowie die Repositionierung nach dem Entwicklungsprozess muss sehr vorsichtig geschehen, ohne den Messaufbau zu berühren. Zur Rekonstruktion der Objektwelle wird das fertige Hologramm in die Halterung eingesetzt und die Objekte entfernt. Zur Dokumentation Ihrer Ergebnisse werden mittels DSLR-Kamera Fotos aufgenommen, indem Sie durch manuelle Fokussierung auf verschiedene Ebenen des rekonstruierten Bildes die Dreidimensionalität nachgewiesen wird.

Hologramminterferometrie führen wir in Form des Doppelbelichtungsverfahrens durch. Der Aufbau entspricht dem für das Transmissionshologramm mit reflektierendem Objekt. Als Objekt dient eine zwecks diffuser Reflexion weiß gestrichene Metallplatte, stellvertretend für ein raues Objekt. Im Gegensatz zu sonstigen interferometrischen Messungen, die nur an optisch glatten Flächen möglich sind, bietet die Hologramminterferometrie die Möglichkeit zur Durchführung interferometrischer Messungen auch an rauen Objekten.

Bei einer ersten Belichtung der Fotoplatte wird die komplexe Signalamplitude, die das Objekt charakterisiert, im Hologramm als Intensitätsverteilung gespeichert. Nun wird das Objekt etwas verändert, in unserem Fall gekippt, und dem veränderten Objekt entspricht eine neue Signalwelle. An der Rekonstruktionswelle wird nichts geändert. Als Rekonstruktion des doppelt belichteten Hologramms erscheint das Bild des Objektes mit überlagerten Interferenzstreifen, deren Verlauf ein Maß für die Unterschiede zwischen dem Objekt und dem veränderten Objekt ist.

Ein Weißlichthologramm kann mit einem sehr einfachen Versuchsaufbau hergestellt werden. Objekt- und Referenzwelle fallen von verschiedenen Seiten auf die Fotoplatte. Da die Intensität der Referenzwelle in diesem Fall nicht unabhängig von der Objektwelle angepasst werden kann, muss das Objekt so dicht wie möglich hinter der Fotoplatte positioniert werden, um die Reflexionsverluste zu minimieren. Zusätzlich begrenzt die vorgegebene Dicke der Fotoschicht die Variationsmöglichkeit von Aufbau und Objektauswahl.

5. Schwerpunkte und Fragen

Fragen zur Vorbereitung:

1. Grundlagen

Wie entsteht ein Hologramm (Voraussetzungen; Objektwelle, Referenzwelle, Interferenz; Rekonstruktion)

2. Versuchsaufgaben und –ziele

Kohärenzeigenschaften der Lichtquelle; prinzipieller Versuchsaufbau; Wirkungsweise verwendeter optischer Bauteile; fotografische Speicherung

Weitere Fragen zum Versuch:

1. Welche Arten von Interferometern gibt es, nennen Sie Beispiele.
2. Nennen Sie Beispiele für Wellenfrontteilung und für Amplitudenteilung.
3. Was sind räumliche und zeitliche Kohärenz? Mit welchen Versuchsanordnungen kann man räumliche oder zeitliche Kohärenz untersuchen bzw. nachweisen?
4. Wie entstehen Speckles, wovon hängt ihre Größe ab?
5. Was sind dünne und dicke Gitter, welche unterschiedlichen Eigenschaften haben sie?
6. Worin besteht der Unterschied zwischen einem Transmissionshologramm und einem Reflexionshologramm, nennen Sie Beispiele?
7. Wie sieht die Schwärzungskurve von Fotoemulsion aus, wie funktioniert der fotografische Prozess?
8. Unter welchem Winkel findet man die Hauptmaxima beim Gitter?
9. Sie möchten ein mit monochromatischem Licht beleuchtetes Michelson-Interferometer so einstellen, dass auf einem ausgeleuchteten Durchmesser von 40 mm 5 dunkle Streifen entstehen, um welchen Winkel müssen Sie einen der beiden Spiegel kippen?
10. Warum wird in einem der beiden vorgeschlagenen Versuchsaufbauten ein Teilerwürfel als Strahlteiler verwendet und im anderen Aufbau eine Keilplatte? Warum kann man im zweiten Fall keine Planplatte benutzen?
11. Wie erzeugt man eine „ebene Welle“, die dem theoretischen Ideal am nächsten kommt?
12. Wie kann man eine „ebene Welle“ auf Ebenheit testen?
13. Schätzen Sie den Abstand der entstehenden Interferenzstreifen ab, wenn Sie zwei ebene Wellen im Winkel von 45° zueinander zur Erzeugung eines holografischen Gitters verwenden. Kann man dieses Gitter mit Hilfe eines Lichtmikroskops sehen? Wo liegt die Auflösungsgrenze von Lichtmikroskopen?