

Philipps-Universität Marburg

FB 13 Physik

WS 2004/05

Fortgeschrittenen - Praktikum

Leitung: Dr. Wolfgang Rühle

Verfasser: Katrin Hofmann; Sebastian Sohl

Datum: 20.11.2004

# HOLOGRAPHIE

# I. THEORIE

## ALLGEMEINES

### KOHÄRENZ

(VON LAT. *COHAERERE* = ZUSAMMENHÄNGEN)

Kohärenz bezeichnet die Eigenschaft einer Welle, über einen größeren räumlichen und/oder zeitlichen Bereich hinweg eine definierte Phasenbeziehung aufzuweisen. Kohärenz ist Voraussetzung für Interferenz.

Man unterscheidet zwischen räumlicher und zeitlicher Kohärenz.

#### *ZEITLICHE KOHÄRENZ*

Zeitliche Kohärenz ist direkt verbunden mit der Frequenzbandbreite der Schwingung. An einem festen Punkt im Raum ändert sich die Phase von annähernd monochromatischem Licht, also Licht fast exakt einer Frequenz und damit einer Farbe, wie es von einem Laser erzeugt werden kann, über viele Schwingungsperioden hinweg wie eine gleichmäßige Schwingung. Nach einiger Zeit, der Kohärenzzeit, ändert sich die Phase gegenüber dieser gedachten Schwingung jedoch. Der Weg, den das Licht während der Kohärenzzeit zurücklegt, wird *Kohärenzlänge* genannt.

#### *RÄUMLICHE KOHÄRENZ*

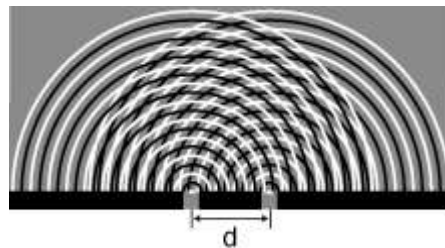
Räumliche Kohärenz beschreibt die Phasenbeziehung zwischen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung getrennten Raumbereichen und hat mit der Kohärenzlänge nichts zu tun. Sie hängt nicht nur von der Beschaffenheit der Lichtquelle ab, sondern auch vom Abstand zur Lichtquelle: Je weiter von der Lichtquelle entfernt die räumliche Kohärenz gemessen wird, desto größer ist sie. Im Grenzfall einer unendlich weit entfernten Lichtquelle erscheint diese punktförmig und die Wellen eben und damit räumlich kohärent.

### BEUGUNG

Die physikalische Grundlage für Beugung ist die Interferenz von Wellen, d.h. ihre Überlagerung. Sie führt zu gegenseitiger Verstärkung (konstruktive Interferenz) oder gegenseitiger Abschwächung (destruktive Interferenz) Daher wird Interferenz und Beugung in Zusammenhang mit allen Wellen beobachtet.

Beugung kann unter anderem gut beobachtet werden, wenn geometrische Strukturen eine Rolle spielen, deren Größe mit der Wellenlänge der verwendeten Wellen vergleichbar ist.

#### *BEUGUNG AM DOPPELSPALT*



Eine Welle trifft auf zwei dicht beieinander liegende Spalte, dahinter überlagern sich

die beiden Teilstrahlen. Es ergibt sich eine Reihe von Interferenzmaxima mit der Eigenschaft, dass der Weglängenunterschied der beiden, das an einem Einfachspalt in eine bestimmte Richtung abgelenkt wird, in zwei Hälften, können sich diese beiden Anteile des Lichtbündels konstruktiv oder destruktiv überlagern. An einem Spalt ergibt sich so wieder eine Reihe von Beugungsmaxima.

#### **LICHTBEUGUNG AM GITTER**

Sind in regelmäßigen Abständen viele Spalte angeordnet, ergibt sich eine Reihe von Beugungsreflexen, deren Anordnung derjenigen entspricht, die man bei einem Doppelspalt mit dem gleichen Abstand erwartet. Mit zunehmender Anzahl der Einzelspalte werden die Reflexe aber zu immer schärferen Linien. Da die Lage der Reflexe von der Wellenlänge des Lichtes abhängt, kann man optische Gitter zur Trennung verschiedener Wellenlängen nutzen.

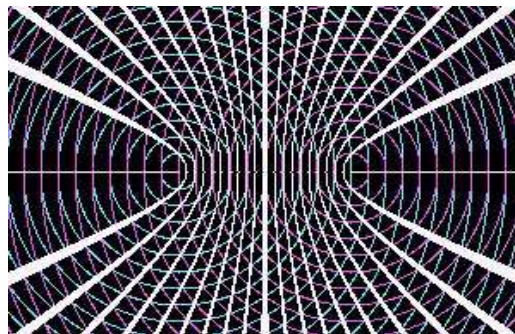
#### **UNTERSCHIED VON BRECHUNG UND BEUGUNG**

Während *Brechung (Refraktion)* die Richtungsänderung einer Welle durch veränderte Geschwindigkeit beim Übergang in ein anderes Medium ist, bedeutet *Beugung (Diffraktion)* die Ablenkung an einem Hindernis (Spalt, Gitter, usw).

#### **INTERFERENZ**

Interferenz ist ein Phänomen, das bei der Überlagerung von Wellen vorkommt. Bei gleicher Wellenlänge und gleichem Takt verstärkt sich die Amplitude, bei verschobenem Takt bzw. Phase wird die Welle ausgelöscht. Interferenz zweier gegenlaufender Wellen gleicher Frequenz führen zu einer stehenden Welle.

Die Interferenz von zwei kreisförmigen Wellengruppen gleicher Wellenlänge, erzeugt hyperbelförmige Interferenzmaxima.



#### **AUFLÖSUNGSVERMÖGEN NACH ERNST ABBE**

Das Auflösungsvermögen errechnet sich wie folgt

$$U = \frac{A}{\lambda} = \frac{n \cdot \sin \alpha}{\lambda} \quad \text{mit}$$

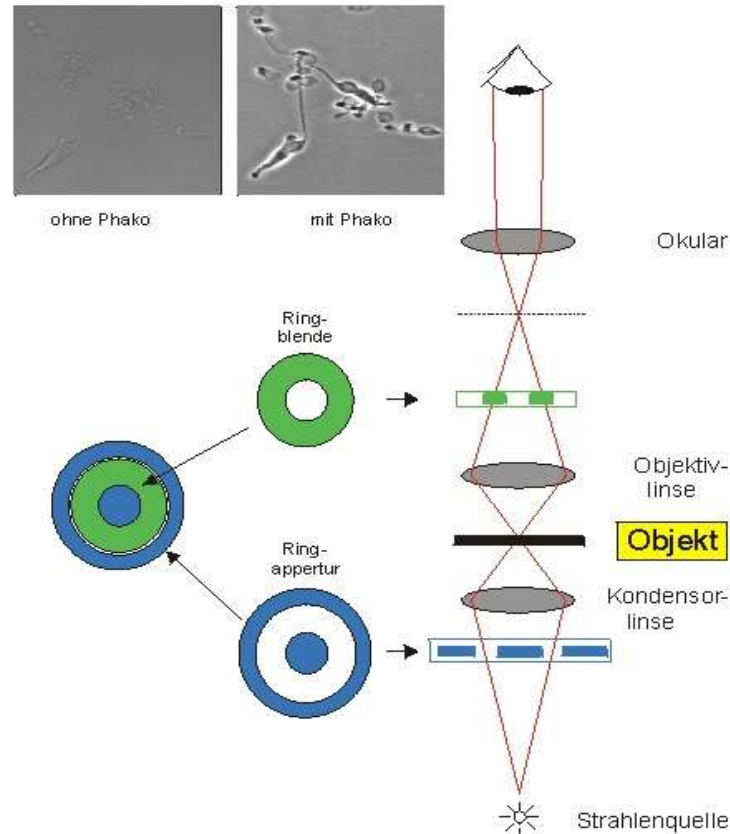
$A = n \cdot \sin \alpha$  die numerische Apertur

$\alpha$  – Öffnungswinkel

$n$  – Brechzahl

$\lambda$  – Wellenlänge

## PHASENKONTRASTVERFAHREN



Das Phasenkontrastmikroskop stellt Unterschiede im Brechungsindex als Helligkeitsunterschiede dar. Objekte mit höherem Brechungsindex (zB Zellen) werden gegenüber solchen mit kleinerem Brechungsindex (zB Wasser) dunkler abgebildet. Damit kann das Phasenkontrastmikroskop gute Bilder von nicht oder nur schwach gefärbten Objekten, wie zB lebenden Zellen, liefern.

Phasenkontrast-Ausrüstung ist billig, einfach zu handhaben und dementsprechend weit verbreitet. Sie besteht aus zwei Blenden, die in ein normales Lichtmikroskop eingebaut werden: eine Ringblende im Objektiv und eine Ringapperturblende im Kondensator. Die Abmessungen dieser beiden Blenden sind so beschaffen, daß sie nur einen dünnen, ringförmigen Spalt im Lichtweg freilassen, wenn die Blenden genau zentriert sind (Aufsicht links in der Abbildung). Der Lichtstrahl hat im Phasenkontrastmikroskop also die Form eines Hohlkegels.

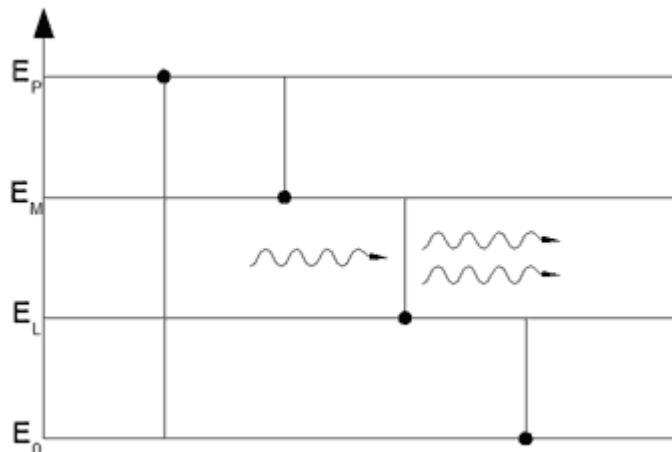
Die Kontrastbildung beruht darauf, daß Lichtstrahlen in Medien mit höherem Brechungsindex stärker gebrochen werden als in Medien mit geringerem Brechungsindex. Stärker gebrochenes Licht erfährt gegenüber weniger stark gebrochenem eine Phasenverschiebung, die von der Blendenoptik des Mikroskops als Helligkeitsänderung dargestellt wird. Da sich der Brechungsindex annähernd proportional mit der Dichte des Objektes ändert, entspricht die Helligkeitsverteilung des Bildes in etwa der Dichteverteilung im biologischen Material.

Zusätzlich treten in Phasenkontrastbildern helle oder dunkle Halos entlang den Kanten von Zellen und anderen Strukturen auf (Bild oben rechts). Diese Halos erzeugen einen optischen dreidimensionalen Effekt, der jedoch keineswegs der räumlichen Struktur des Objekts entsprechen muß.

## LASER

Ein Laser ist eine Lichtquelle, die Licht durch stimulierte Emission erzeugt. Dieses Licht besitzt unter anderem eine große räumliche Kohärenz, wodurch es sich besonders gut zu einem gebündelten Laserstrahl kollimieren lässt. Aufgrund der ebenfalls großen zeitlichen Kohärenz des Laserlichtes (eines kontinuierlichen Lasers) ist dieser in der Lage, extrem monochromatisches Licht zu liefern. Das Wort *Laser* ist ein Akronym von **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung).

### WIRKUNGSPRINZIP



Durch Energiezufuhr kann ein Elektron eines Atoms, Moleküls oder Kristalls in einen angeregten Zustand wechseln. Licht entsteht dadurch, dass ein Elektron von solch einem energiereicheren zu einem energieärmeren Zustand wechselt, wobei die Energiedifferenz in Form eines Lichtteilchens (Photon) abgegeben wird. Der entgegengesetzte Vorgang ist die Absorption, bei der durch die Energie eines Photons ein Elektron in ein höheres Energieniveau gehoben wird.

### SPONTANE EMISSION

- sowohl der Zeitpunkt als auch die Richtung, in die das Photon ausgesendet wird, sind zufällig

### STIMULIERTE EMISSION

- Prinzip beim Laser
- ein Lichtteilchen stimuliert diesen Übergang, und dadurch entsteht ein zweites Lichtteilchen, dessen Eigenschaften mit dem des ersten identisch sind; es erfolgt Lichtverstärkung.

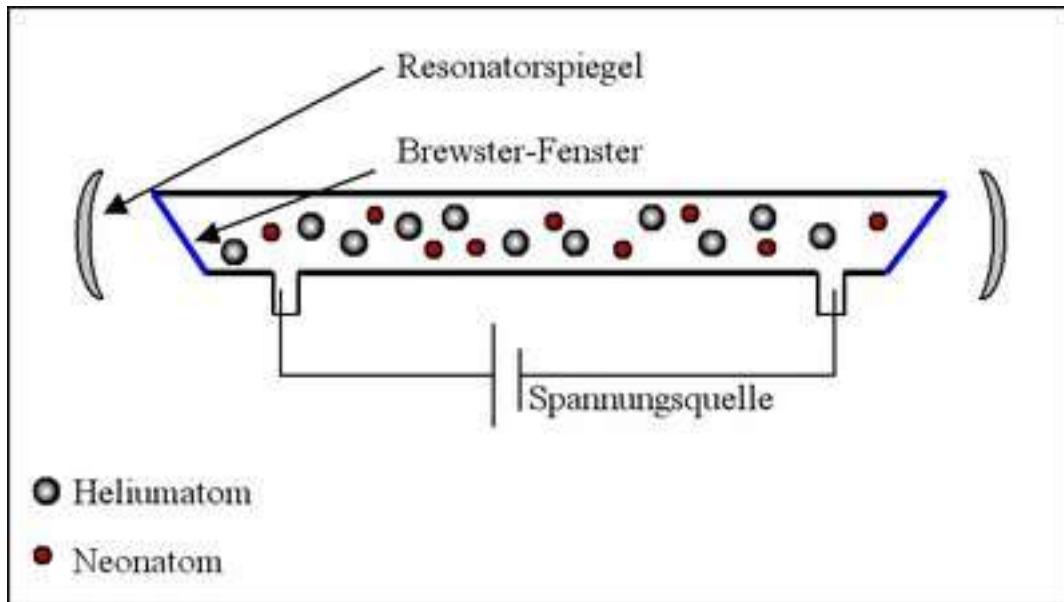
## HELIUM-NEON-LASER

Der Helium-Neon-Laser besteht im wesentlichen aus einem dünnen Glasröhrchen (Durchm. ca 1 mm, Länge ca. einige 10 cm) in welchem sich ein Helium-Neon-Gasgemisch befindet.

Dieses Gasgemisch steht unter einem Druck von ca. 100 Pa, mit einem Verhältnis von  $\frac{\text{Helium}}{\text{Neon}}$  von  $\frac{10}{1}$ . An den Enden befinden sich sog Brewster-Fenster. Dabei handelt es sich um planparallele Platten, die Licht mit einer bestimmten Polarisationsrichtung

ohne Verluste durch Reflexion hindurchlassen. Licht mit dazu senkrechter Polarisation wird teilweise reflektiert, teilweise hindurchgelassen. Der Grund für diese Anordnung ist, dass der Anteil des reflektierten Lichts beim Brewster-Winkel am kleinsten ist, als Nebeneffekt ist das Laserlicht teilweise polarisiert. Dieser Aufbau befindet sich zwischen zwei Spiegeln, die den Resonator darstellen.

Der Helium-Neon-Laser emittiert Licht der Wellenlänge von 632.8 nm. Ausgangsleistung eines solchen Helium-Neon-Lasers liegt im Bereich von einigen mW.

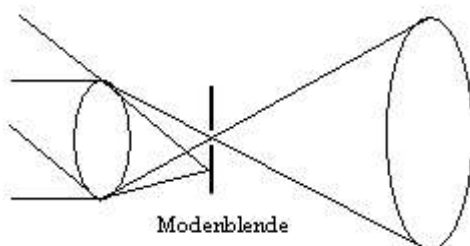


### EINLEITENDE FRAGEN

(a) Funktion einer Modenblende (Raumfilter) bei der Aufweitung des Referenzbündels mit Hilfe der abbeschen Abbildungstheorie!

Weshalb ist ein Raumfilter von Vorteil?

Die Modenblende sorgt dafür dass unerwünschte Moden aufgehoben werden. Mit anderen Worten ist sie dazu gut, dass Aberrationen ausgeschaltet werden und es somit zu keinen unerwünschten Fehlern im Hologramm kommt.



(b) Die Objektwelle  $E_G$  und die Referenzwelle  $E_R$  seien ebene Wellen, die Symmetrisch zur Flächennormalen der Hologrammebene im Winkel von  $\alpha = 60^\circ$  einfallen!

1. Wie groß ist der Abstand  $d$  der entstehende Interferenzstreifen

2. In welcher Größenordnung dürfen sich die optischen Bauelemente während der Aufnahme bewegen?

Um Beugungseffekte zu erhalten muß sich die Größe der Bauelemente im Wellenlängenbereich bewegen.

3. Welche Anforderungen ergeben sich aus 1. für das zu verwendende Fotomaterial?

Das Fotomaterial muss größer  $d$  sein, sonst hätte man nur eine verwaschene graue Fläche.

Das Auflösungsvermögen des Fotomaterials muss ebenso größer  $d$  sein.

(c) In welchen Verhältnis müssen die Intensität der Objektwelle  $I_G$  und die Intensität der Referenzwelle  $I_R$  stehen, damit ein maximaler Kontrast  $K=1$  entsteht?

Es gilt  $I(y, z) \propto (A_G^2 + A_R^2 + 2 A_G A_R \cdot \cos(\phi_G - \phi_R))$

$$\Rightarrow I = I_G + I_R + 2 \cdot \sqrt{I_G I_R} \cdot \cos(\phi_G - \phi_R)$$

Bei konstruktiver Interferenz nimmt die Intensität ihr Maximum an und es gilt

$$\phi_G - \phi_R = 2\pi \cdot m, \quad m \in \mathbb{N}$$

$$\Rightarrow I_{Max} = I_G + I_R + 2\sqrt{I_G I_R} \quad (1)$$

Bei destruktiver Interferenz nimmt die Intensität ihr Minimum an und es gilt

$$\phi_G - \phi_R = (2m + 1) \cdot \pi, \quad m \in \mathbb{N}$$

$$\Rightarrow I_{Min} = I_G + I_R - 2\sqrt{I_G I_R} \quad (2)$$

$$\stackrel{(1) \text{ und } (2)}{\Rightarrow} K = \frac{I_{Max} - I_{Min}}{I_{Max} + I_{Min}} = \frac{4\sqrt{I_G I_R}}{2(I_G + I_R)} \stackrel{!}{=} 1$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sqrt{I_G I_R}}{(I_G + I_R)} = \frac{1}{2} \Leftrightarrow I_G I_R = \frac{1}{2} \cdot (I_G^2 + 2 I_G I_R + I_R^2) \Leftrightarrow I_G = I_R$$

Wir erhalten also ein Verhältnis von 1:1 für  $I_G : I_R$

Man sollte allerdings nicht dieses Verhältnis nehmen, sondern als Kompromiss ein Verhältnis von  $\frac{I_G}{I_R} \approx 0,2$ , da sonst Schwärzung, Signalverzerrung oder Transparenz auftreten können.

**Schwärzung:** helle und dunkle Bereiche sind so dicht gespannt, dass die hellen Bereiche ebenso geschwärzt werden und somit das Hologramm zerstört wird

**Transparenz:** die hellen Flächen sind durchsichtig, im Gegensatz zu den schwarzen, was zu einer Unschärfe des Hologramms führt

**Signalverzerrung:** modulierte Licht verliert beim Durchgang durch eine Faser des Fotomaterials nicht nur Energie, sondern auch Informationen, auf Grund der Pulsverbreiterung von Lichtpulsen durch verschiedene Mechanismen; man erhält dann entweder eine Moden-, Material- oder Wellenleiterdispersion

(d) Welche verschiedenen Arten von Hologrammen gibt es?

**1. Amplitudenhologramm:**

- Die Objekthelligkeit schlägt sich in der Filmschwärzung nieder
- Die Phase ergibt sich in den Abständen der Hologrammstruktur
- sehr Lichtempfindlich

**2. Phasenhologramm:**

- bestehen aus transparenten Material
- Die Informationsspeicherung findet durch dicken des Materials oder Brechzahländerungen statt
- Die Phase schlägt sich im Streifenabstand nieder; die Objekthelligkeit in den Schichtdicken

**3. Transmissionshologramm:**

- fast alle Hologramme sind Transmissionshologramme (außer z.B. Volumengramme)
- Der Beobachter befindet sich auf der dem Rekonstruktionlaser abgewandten Seite des Hologramms (auf Grund der Qualität)
- sehr Licht- und Hitzeempfindlich (ein Unterschied wie Dia zu Papier)

**4. Reflexionshologramm:**

- sind ähnlich zu Transmissionshologrammen, haben aber Wärmeleitende Unterlagen (z.B. Edelstahl, Kupferplatten)
- das Hologramm wird in der lichtempfindlichen Schicht erzeugt oder auf bereits existierende Hologramme aufkopiert

**5. Weißlichthologramm:**

- sind Hologramme mit Dispersionselement
- Weißes Licht als Referenzquelle
- Überlappung der einzelnen Hologrammebenen (Ergebnis ist ein farbig verschwommenes Bild)
- Rekonstruktion geschieht mit weißem Licht (Regenbogenhologramme); die dabei beobachtete Farbe hängt vom Blickwinkel ab

**6. Farbhologramm:**

- Voraussetzung sind Laser die zueinander genau blaues, grünes und rotes Licht aussenden
- Das Hologramm wird mit drei Lichtbündeln zeitgleich und unter gleichen Winkeln beleuchtet
- die Farbauszüge sind streng getrennt (drei Filmebenen)
- Wiedergabe nur mit dreifarbigem Lasern



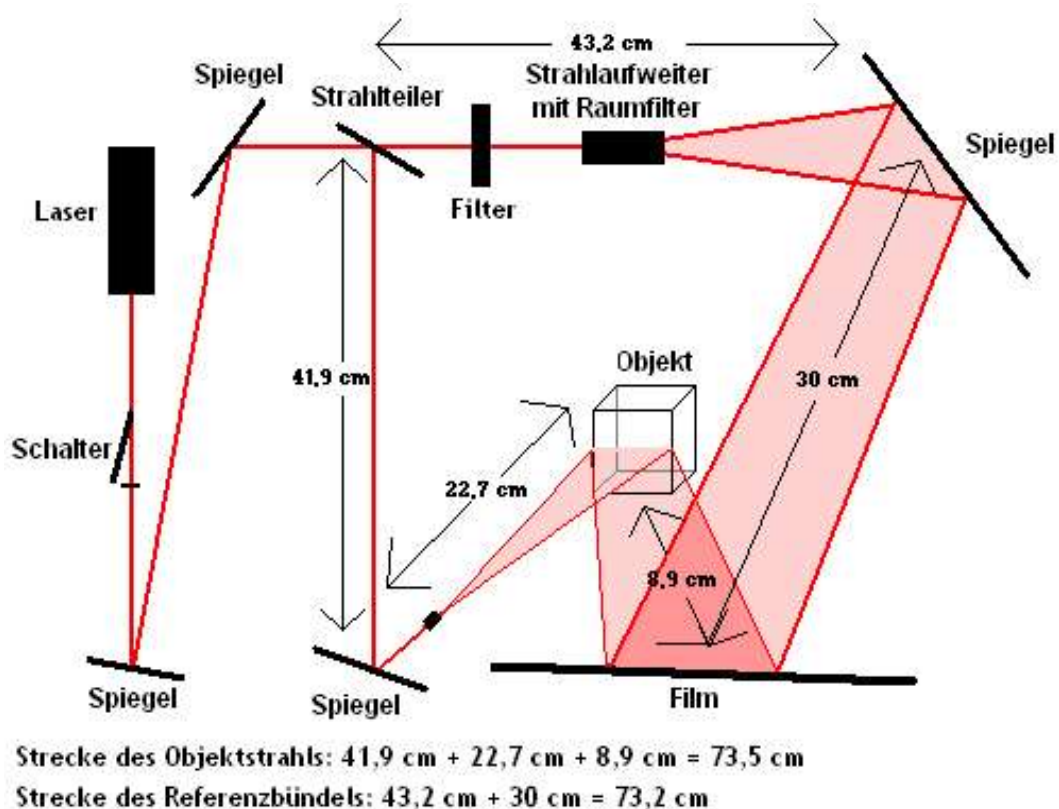
## II. PRAXIS

### ZIEL DES VERSUCHES

Mit einem Helium-Neon-Laser soll ein Amplituden- oder Phasenhologramm aufgenommen werden.

### VERSUCHSAUFBAU

Der Versuch ist folgendermaßen aufgebaut:



Der Laserstrahl trifft zuerst auf einen zeitgesteuerten Schalter. Danach wird er über zwei Spiegel gelenkt und dann von dem Strahlteiler in den Referenzstrahl und den Objektstrahl aufgespaltet.

Die Intensität des Referenzstrahls wird durch Filterkombinationen geregelt. Nachdem der Referenzstrahl die Modenblende und den Strahlaufweiter passiert hat, wird er durch Spiegel auf dem Film gelenkt.

Der Objektstrahl wird ebenfalls über Spiegel durch ein Mikroskopobjektiv gelenkt und fällt dann als aufgeweitetes Bündel auf das Objekt, von dem aus das Licht auf den Film reflektiert wird und dort mit den Referenzbündel interferiert,

### VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Zunächst ist es wichtig die Apperatur zu justieren. (In der Versuchsbeschreibung ausgie-

big beschrieben)

Danach sollte man darauf achten, dass ,wegen der Kohärenzlänge des Laserlichts, die Strahlenlänge des Objektstrahles und des Referenzstrahles in etwa gleich lang sind. In unseren Fall traf das auch in etwa zu (Abweichung von  $< 1$  cm; siehe Versuchsaufbau).

Die Entwicklung und Rekonstruktion des Hologramms sind ausgiebig in der Versuchsbeschreibung erläutert.

Was allerdings noch wichtig ist, ausser das man aufpasst, dass man den Raum nicht unter Wasser setzt beim entwickeln, ist die Ermittlung der Leistungen Objekt- und Referenzstrahl und die damit verbundene Abstimmung der Leistungen von  $\frac{P_O}{P_R}$  von  $\frac{1}{5}$  ,durch Benutzung von Blaufiltern. Und die Berechnung der Belichtungszeit des Filmmaterials wie folgt.

$$\text{Belichtungsdichte } E = 60 - 100 \frac{\mu J}{cm^2}$$

$$\text{Leistungsmessgerät } A = 0,6 cm^2$$

$$\text{Leistung Laser } P_L = 635 \mu W$$

$$P_{Ges} = P_O + P_R \text{ mit } P_R = 5 P_O$$

$$\text{Die Ermittlung mit dem Powermeter ergab } P_O = 0,56 \mu W \Rightarrow P_R = 5 P_O = 2,8 \mu W$$

Um dies zu gewährleisten haben wir zwei Blaufilter mit einer Dichte von  $0,15 \frac{g}{cm^3}$

und  $0,3 \frac{g}{cm^3}$  verwendet

Es gilt

$$E = \frac{p \cdot t}{A} \Leftrightarrow t = \frac{E \cdot A}{P} = \frac{E \cdot A}{6 P_O} \Rightarrow t = \frac{60 \frac{\mu J}{cm^2} \cdot 0,6 cm^2}{6 \cdot 0,56 \mu W} = 10,714 s$$

## AUSWERTUNG

Folgende Fragen sollten beantwortet werden:

(1) *Betrachten Sie das Hologrammbild aus zwei verschiedenen Richtungen. Was fällt auf? Welche Erscheinungen stören?*

Wenn man das Hologramm dreht kann man sich das Objekt aus verschiedenen Perspektiven betrachten. Es wirkt wie ein dreidimensionales Bild. Störend wirkt mit unter eine schlechte Auflösung oder Fehler wie unerwünschte Objekte (z.B. Schraube der Apparatur) im Bild. Zudem wirkt das Hologramm aus einem sehr hohen Winkel wie eine zweidimensionale Abbildung des Objektes.

(2) *Betrachten Sie das rekonstruierte Bild durch blenden mit verschiedenen Durchmesser. Was ändert sich?*

Das Bild wird unscharf je größer die Blende ist, ohne Blende erreicht das Bild seine beste Qualität.

(3) *Was ergibt sich beim Umdrehen der Hologrammplatte um eine vertikale Achse um  $180^\circ$ ?*

Beim drehen, dreht sich das Bild ebenso. So das nach  $180^\circ$  das Bild auf dem Kopf steht.