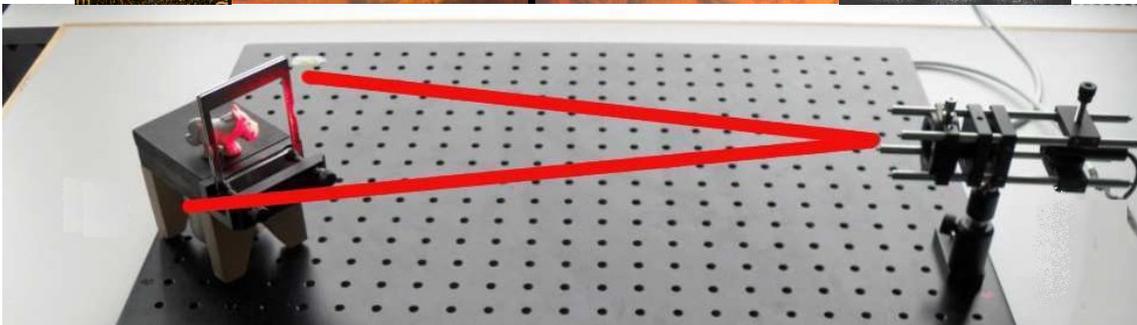
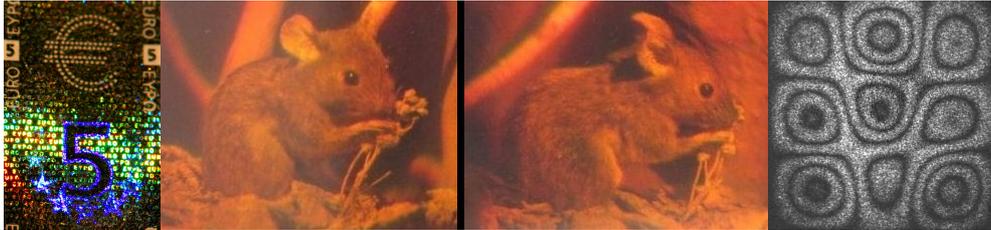


Die Physik Schülerlabor Initiative



Versuch: Holografie



Einleitung

Ein Hologramm ist eine dreidimensionale Aufnahme eines Gegenstands. Im Gegensatz zur Fotografie, die abgebildete Objekte nur zweidimensional darstellen kann, verändert sich bei einem Hologramm das wahrgenommene Bild, wenn man den Blickwinkel ändert, genauso wie beim realen Gegenstand.



Abbildung 1: Hologramm

Um ein Hologramm aufzunehmen, benötigt man einen Laser, der zu einem Teil ein Objekt beleuchtet und zu einem anderen auf einen Film (der ähnlich aufgebaut ist wie ein Fotografiefilm) fällt. Das Hologramm entsteht dadurch, dass sich im Film die vom Objekt reflektierten Lichtwellen mit denen, die direkt vom Laser ausgesandt wurden, überlagern. Bestrahlt man das Interferenzmuster, das dabei entsteht, nach der chemischen Entwicklung des Films mit Licht, das die gleiche Wellenlänge wie bei der Aufnahme hat, so ergibt sich ein dreidimensionales Bild des Gegenstands.

Der Unterschied zwischen einem Foto und einem Hologramm besteht also darin, dass ein Foto nur die Intensität des auf den Film auftreffenden Lichts speichert. Ein Hologramm speichert in seinem Interferenzmuster die Intensität und die Phase des Lichts, die nötig ist, um den Gegenstand dreidimensional zu rekonstruieren.

Die Aufzeichnung eines Gegenstands in drei Dimensionen wird in der Forschung und Industrie verwendet, um beispielsweise in der Medizin Gesichter für plastisch-chirurgische Eingriffe zu vermessen oder in der Archäologie empfindliche Funde genau zu untersuchen. Außerdem sind auch Hologramme vermutlich als Echtheitszertifikate, etwa auf Geldscheinen oder Ausweispapieren bekannt. Wird ein Hologramm mit einem Fotokopierer vervielfältigt, geht die Information über die dreidimensionale Ausdehnung des Objekts verloren. Hologramme sind daher schwer reproduzierbar und fälschungssicher.



Abbildung 2:
Hologramm auf
einem Geldschein

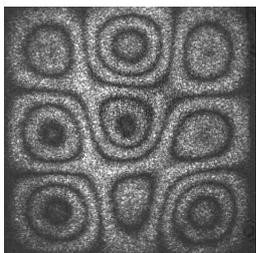


Abbildung 3: Hologramm
einer verformten Platte

Da man einen Holografiefilm mehrfach belichten kann (die verschiedenen Interferenzmuster überlagern sich dann einfach), wird die Holografie oft in der Interferometrie angewandt. Hierbei kann man winzigste Veränderungen, z.B. Verformungen eines Körpers messen, indem man ihn beispielsweise vor und nach der Einwirkung einer Kraft auf dem gleichen Film holografiziert. Die Objektwelle verändert sich mit dem Gegenstand und interferiert mit der ersten Objektwelle, wodurch Streifen auf dem Hologramm entstehen, die erlauben, Rückschlüsse auf die Verformung zu ziehen.

Im Holografie-Versuch des Schülerlabors Physik könnt ihr selbst zwei Hologramme mit verschiedenen experimentellen Anordnungen aufnehmen und entwickeln. Im Vorfeld solltet ihr dazu mit den Arbeitsblättern zur Vorbereitung die physikalischen Grundlagen der Holografie und das Prinzip der chemischen Filmentwicklung kennen und verstehen lernen. Eine Schwierigkeit des Holografie-Versuchs ist, dass zumindest während der Filmbelichtung und -entwicklung in einem abgedunkelten Raum gearbeitet werden muss. Es ist daher besonders wichtig, auch auf den praktischen Teil des Versuchs vorbereitet zu sein, um nicht im Dunkeln die Orientierung zu verlieren.



Physikalische Grundlagen der Holografie

Bei der Aufnahme eines Fotos wird der in die Kamera eingelegte Film proportional zur Intensität des vom abgebildeten Gegenstand ausgehenden Lichts geschwärzt. Das Foto speichert also Informationen über die Amplitude der auftretenden Welle in jedem Punkt der Filmebene. Eine Welle einer bestimmten Wellenlänge zeichnet sich außer durch ihre Amplitude aber auch durch ihre Phase aus. Diese Information geht bei der Fotografie verloren. Auf den dreidimensionalen Aufbau des abgebildeten Gegenstands kann man nur durch die Bildschärfeschließen, bzw. darüber, dass das Gehirn das zweidimensionale Bild mit Erinnerungen vergleicht und so die dritte Dimension rekonstruiert.



Abbildung 1: Foto einer Katze



Abbildung 2: Hologramm einer Maus aus verschiedenen Blickwinkeln

Bei der Holografie wird die vom Gegenstand ausgehende Lichtwelle mit einer zweiten Welle, der sogenannten Referenzwelle, überlagert. Dadurch entsteht ein Interferenzmuster, das im Film gespeichert wird. Das Hologramm speichert mit dieser Methode nicht nur Informationen über die Amplitude, sondern auch über die Phase der auftreffenden Lichtwelle. Dadurch kann man exakt rekonstruieren, wo die Punkte lagen, von denen das Licht ausging. Man erhält also eine dreidimensionale Struktur des holografierten Objekts.

Betrachtet man das Hologramm aus verschiedenen Blickwinkeln, so verändert sich das Bild, wie es auch bei der Betrachtung des realen Gegenstands der Fall wäre.

Es gibt verschiedene Arten von Hologrammen, je nach ihrem Material und der Art der Aufnahme. Wir unterscheiden zunächst dünne und dicke, oder auch Flächen- und Volumen hologramme. Bei einem dünnen oder Flächenhologramm ist die Filmemulsion, in der die Informationen gespeichert werden, so dünn, dass man sie als zweidimensional betrachten kann. Dies ist natürlich eine Idealisierung, weswegen beinahe alle realen Hologramme als Volumen hologramme bezeichnet werden können, bei denen die Emulsionsschicht eine endliche Dicke hat.

Außerdem unterscheidet man Amplituden- und Phasenhologramme. Bei Amplituden-Hologrammen wird das Interferenzmuster im Film bei der Entwicklung in ein Absorptionsmuster umgewandelt. Der Film wird also, ähnlich wie beim Foto, proportional zur Intensität des Lichts geschwärzt, lässt an diesen Stellen dann Licht nicht mehr oder weniger gut passieren und beugt es dadurch. Bei Phasen-Hologrammen wird das Interferenzmuster in ein Brechungsindexmuster umgewandelt. Der Film bleibt also komplett durchsichtig, es ist kein „Negativ“ zu sehen, das Licht läuft aber je nach Brechungsindex schneller oder langsamer durch den Film und kann dadurch gebeugt werden. Die Gesetzmäßigkeiten, nach denen die Beugung abläuft, sind dabei für Absorptions- und Brechungsindexmuster gleich.

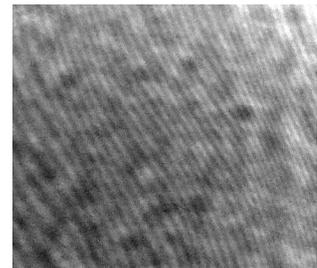


Abbildung 3: Absorptionshologramm

Im Schülerlabor werden wir nur Phasen-Volumenhologramme herstellen. Auch hierbei kann man noch eine Unterscheidung vornehmen: Es gibt Transmissions- und Reflexionshologramme, die sich durch die Anordnung, die zur Aufnahme benutzt wird, unterscheiden. Beim Transmissions-Hologramm treffen die beiden sich überlagernden Wellen von der gleichen Seite auf den Film, bei Reflexionshologrammen von verschiedenen, wodurch sich starke Unterschiede in den jeweiligen Interferenzmustern im Holografiefilm ergeben.



Im Folgenden soll genauer auf die Aufnahme und die Rekonstruktion, also die Erzeugung des Bildes des Gegenstands bei Transmissions- und Reflexionshologrammen eingegangen werden. Bei beiden Varianten wird ein Laser verwendet, dessen Licht zum Teil auf den Film und zum Teil auf das Objekt, das holografiert werden soll, fällt. Wir nennen den Teil des Lichts, der direkt auf den Film trifft, Referenzwelle und den, der vom Objekt reflektiert wird und dann erst aufkommt, Objektwelle. Die Referenzwelle kann man auf Grund der Eigenschaften eines Lasers als eine ebene Welle betrachten. Ihre Wellenfronten sind alle parallel. Die Objektwelle ist viel komplexer, da jeder Punkt des Gegenstands das Laserlicht in Form einer Kugelwelle reflektiert. Die Einhüllende aller dieser einzelnen Kugelwellen bildet die Wellenfront der Objektwelle. Um die Erklärungen zu vereinfachen, betrachten wir im Folgenden den Fall, dass der holografierte Gegenstand nur aus einem Punkt besteht. Dann können wir die Objektwelle als Kugelwelle betrachten.



1. Transmissionshologramme

Bei der Aufnahme eines Transmissionshologramms fallen Referenz- und Objektwelle von der gleichen Seite auf den Holografiefilm.

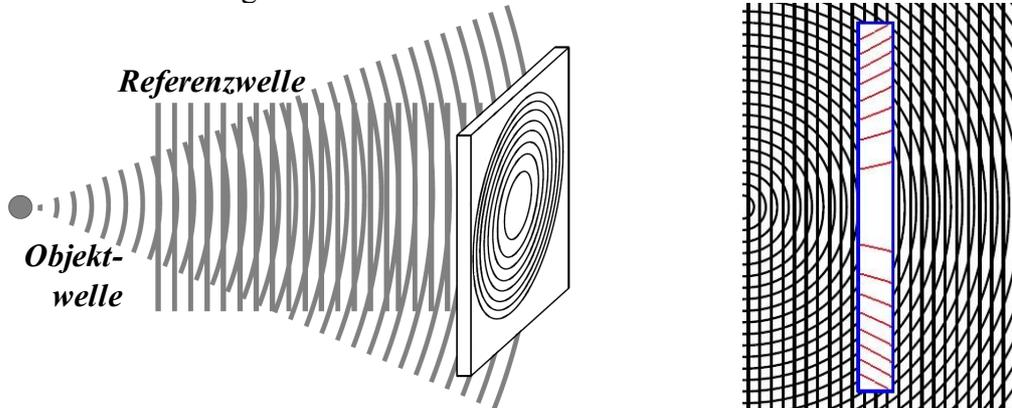


Abbildung 4: Entstehung eines Transmissions-Hologramms und Schnitt durch das Hologramm

Wie ihr in der obenstehenden Grafik sehen könnt, bilden sich als Interferenzmuster einer ebenen und einer Kugelwelle konzentrische Kreise im Holografie-Film aus. Betrachtet man das Hologramm im Querschnitt, so sieht man, dass die Ringe das Hologramm als Schichten durchziehen. Diese Schichten hoher Intensität sind nicht ganz senkrecht zur Oberfläche des Films, da die Durchmesser der Kreise mit zunehmendem Abstand zum Gegenstand etwas größer werden.

Eine Oberfläche mit einem Kreismuster wie dem auf dem Hologramm nennt man Fresnel'sche Zonenplatte. Augustin-Jean Fresnel fand im 19. Jahrhundert heraus, dass ein solches Ringmuster wie eine Konkavlinse parallel eingestrahktes Licht auf einen einzigen Punkt bündelt. Ihre wahre Bedeutung erhielt die Fresnel'sche Zonenplatte allerdings erst mit der Erfindung der Holografie, als man feststellte, dass sie das Hologramm einer punktförmigen Lichtquelle darstellt.

Die Wirkungsweise der Fresnel'schen Zonenplatte lässt sich mit Hilfe der Beugung am Gitter anschaulich verstehen (die Beugung am Gitter wird im Schülerlabor im Versuch „Das Spektrometer“ ausführlich behandelt): Fällt paralleles Licht auf ein Gitter, so wird es gebeugt, da die verschiedenen Teilstrahlen aus den unterschiedlichen Gitteröffnungen miteinander interferieren und sich dabei teils verstärken, teils gegenseitig auslöschen. Es entsteht ein Beugungsmuster mit mehreren Haupt- und Nebenmaxima unter verschiedenen Winkeln, wie ihr es in untenstehender Zeichnung sehen könnt.

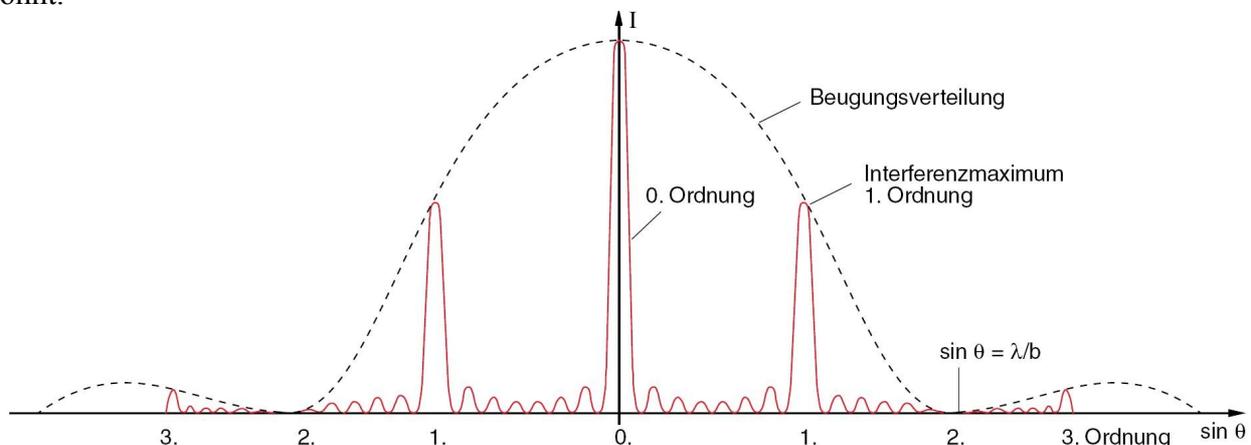


Abbildung 5: Intensitätsverteilung hinter einem Gitter mit acht Spalten (aus: Demtröder: Experimentalphysik2)



Je enger die Gitterspalten zusammen liegen, desto stärker wird das Licht gebeugt, desto größer ist also der Winkel θ , unter dem ein Maximum auftritt.

Bei einer Fresnelschen Zonenplatte beugen alle Teile der Platte, die gleich weit vom Mittelpunkt entfernt sind, das Licht zum gleichen Punkt P , in dem das erste Maximum liegt. Da die Abstände der Ringe, die man auch Fresnelsche Zonen nennt, nach außen hin kleiner werden, wird die Ablenkung des Lichts größer. Der Winkel θ , unter dem das erste Maximum auftritt, nimmt also zu. Die Zonen sind dabei genau so angeordnet, dass alle Teile der Platte das Licht im ersten Maximum zum selben Punkt P hin beugen, wie in in folgender Zeichnung sehen könnt:

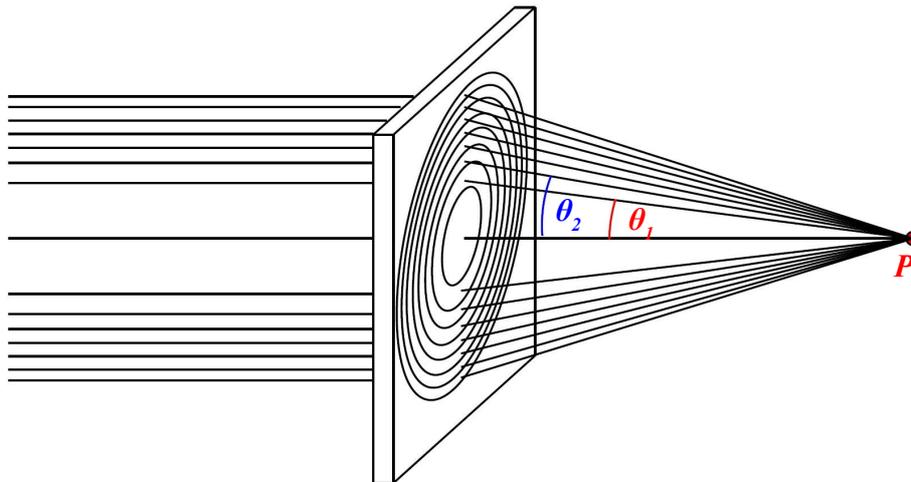


Abbildung 6: Fresnelsche Zonenplatte bündelt paralleles Licht im Punkt P

Bei der Holografie einer punktförmigen Lichtquelle entsteht also eine Fresnelsche Zonenplatte, die parallel einfallende Lichtstrahlen in einem Punkt P bündelt. Hat das einfallende Licht die gleiche Wellenlänge wie das bei der Aufnahme des Hologramms verwendete, so ist der Punkt P genauso weit von der Platte entfernt wie die ursprüngliche Lichtquelle. Bestrahlt man das Hologramm also mit der ursprünglichen Referenzwelle, so erhält man ein Abbild des holografierten Objekts, in diesem Fall des Lichtpunkts. Man sagt, das Objekt wird rekonstruiert.

Ein echter, ausgedehnter Gegenstand kann nun nach dem gleichen Prinzip abgebildet werden. Bei der Reflexion von Laserlicht an einem Objekt geht, wie bereits erwähnt, von jedem seiner Punkte eine Kugelwelle aus. Wir können den beleuchteten Gegenstand also als Konstrukt aus punktförmigen Lichtquellen betrachten, von denen jede einzelne Fresnelsche Zonen erzeugt. Die Überlagerung aller Zonen bildet das Hologramm. Bestrahlt man dieses nach der Entwicklung mit der Referenzwelle, so ergibt sich zu jeder einzelnen Ringstruktur ein Bildpunkt, wir erhalten also eine vollständige dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts.

In unserem Experiment treffen Referenz- und Objektstrahl nicht aus der exakt gleichen Richtung auf das Objekt, sondern der Referenzstrahl schließt mit der Filmebene einen Winkel ein. Dies hat praktische Gründe, da das Objekt seitlich vom Laserstrahl getroffen werden muss, um Licht auf den Film reflektieren zu können, ohne dabei einen Schatten zu werfen. (Mehr dazu auf dem Blatt zu den Versuchsaufbauten.) Die realen Interferenzmuster sehen dadurch etwas komplizierter aus als in unserem Beispiel, prinzipiell ist die Wirkungsweise aber die gleiche.



2. Reflexionshologramme

Bei der Aufnahme eines Reflexionshologramms fallen Referenz- und Objektwelle von verschiedenen Seiten auf den Holografiefilm.

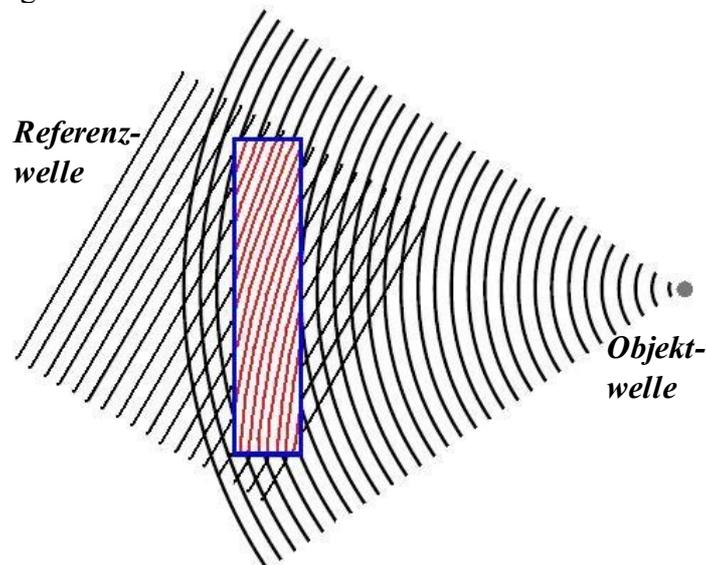


Abbildung 7: Entstehung eines Reflexions-Hologramms

Bei der Überlagerung der ebenen und der Kugelwelle bilden sich im Holografiefilm stehende Wellen aus. Sie erzeugen, wie die obige Abbildung zeigt, als Interferenzmuster Schichten hoher Intensität im Hologramm, die nahezu parallel zueinander und zur Oberfläche verlaufen.

An diesen Schichten, die hoher Lichtintensität ausgesetzt waren und sich durch die Entwicklung beim Phasenhologramm zu Schichten mit geringerem Brechungsindex umgewandelt haben, findet Reflexion statt. Man kann diese erklären, indem man als Analogie ein Bragg-Gitter betrachtet:

William Lawrence Bragg untersuchte zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Eigenschaften von Kristallen. Er fand heraus, dass Röntgenstrahlung, die auf einen Kristall auftrifft, diesen zu einem großen Teil ungehindert durchläuft. Nur ein ganz bestimmter Teil der Strahlung wird vom Kristall zurückgeworfen, die Schichten des Kristalls (Netz- oder Gitterebenen genannt), wirken also hier wie halbdurchlässige Spiegel. Welche Strahlung „reflektiert“ wird, kann man sich mit untenstehender Abbildung leicht erklären:

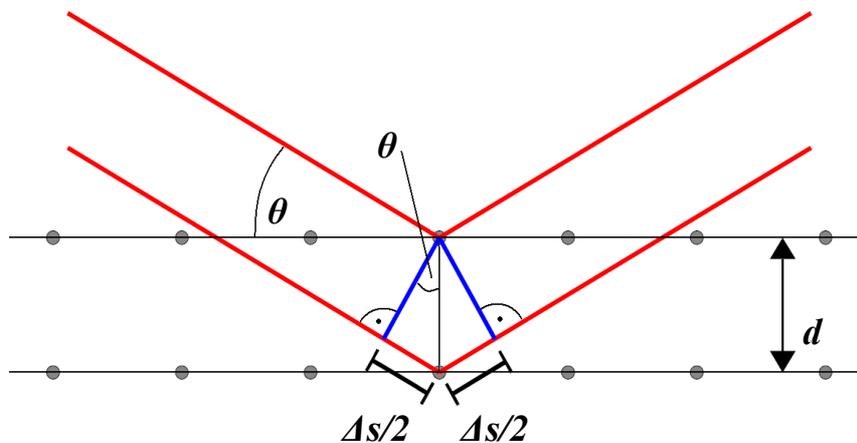


Abbildung 8: Streuung am Bragg-Gitter



Alle Wellen, die auf die Atome des Kristalls treffen, werden gestreut und interferieren dabei miteinander. Dabei löschen sie sich größtenteils gegenseitig aus. Nur die Wellen, die einander maximal konstruktiv überlagern, werden als „reflektierte“ Strahlung wahrgenommen. Wie sich aus der Grafik ersehen lässt, beträgt der Gangunterschied Δs zweier von benachbarten Kristallebenen gestreuter Wellenzüge $\Delta s = 2d \sin \theta$. Dieser Gangunterschied muss für eine maximale Verstärkung ein Vielfaches der Wellenlänge λ betragen. Wir erhalten damit die Bragg-Gleichung:

$$m \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta$$

Nur Wellen, die dieser Gleichung genügen, werden vom Kristall „reflektiert“.

Bei einem Reflexionshologramm findet zwar keine Streuung von Röntgenstrahlen an einzelnen Atomen, sondern Lichtreflexion an Ebenen unterschiedlicher Brechungsindizes statt, das Modell des Bragg-Kristalls lässt sich aber auch hier erfolgreich anwenden:

Bestrahlt man ein fertiges Hologramm aus dem Winkel, aus dem auch der Referenzstrahl bei der Belichtung auftraf, so wird durch Reflexion an den Schichten mit kleinerem Brechungsindex das Bild des Gegenstands rekonstruiert. Das Hologramm reflektiert dabei aufgrund der Bragg-Gleichung nur die Wellenlänge, die auch bei der Aufnahme verwendet wurde. Wir können also ein solches Hologramm mit gewöhnlichem weißem Licht, das alle Wellenlängen enthält, rekonstruieren. Ein Reflexions-Hologramm wird daher auch Weißlichthologramm genannt.

In der Realität ist das Interferenzmuster, das im Holografie-Film entsteht, wesentlich komplexer als das oben gezeigte, da die Objektwelle eines ausgedehnten Gegenstands keine Kugelwelle, sondern eine komplizierte Wellenfront ist. Trotzdem entstehen im Hologramm stehende Wellen und dementsprechend Schichten hoher Intensität, die zwar sehr unregelmäßig geformt sein können, sich aber trotzdem mit der obigen Vereinfachung beschreiben lassen.

Fragen

- Wo liegt der Unterschied zwischen Fotografie und Holografie? Welche Informationen werden jeweils gespeichert?
- Phasenhologramme haben bei der Rekonstruktion des Bildes einen Vorteil gegenüber Amplitudenhologrammen: sie erzeugen hellere Bilder. Könnt ihr euch vorstellen, warum das so ist?
- Von wo treffen Objekt- und Referenzstrahl in der Transmissionsanordnung auf den Holografiefilm? Wie sieht das entstehende Interferenzmuster im Film bei einer punktförmigen Lichtquelle und bei einem ausgedehnten Objekt aus?
- Wie funktioniert die Rekonstruktion des aufgenommenen Gegenstands beim Transmissions-Hologramm?
- Welches Interferenzmuster kommt bei Reflexionshologrammen zustande?
- Was ist die charakteristische Eigenschaft des Bragg-Gitters? Erklärt diese Eigenschaft!
- Was ist der Vorteil eines Reflexions-Hologramms gegenüber eines Transmissions-Hologramms?



Aufbauten zur Aufnahme von Hologrammen

Die Aufnahme von Hologrammen funktioniert schon mit sehr einfachen Versuchsaufbauten. Es handelt sich hierbei um sogenannte Einstrahl-Aufbauten, bei denen ein ungeteilter Laserstrahl verwendet wird, um das holografierte Objekt und den Film zu beleuchten. Mit Mehrstrahl-Aufbauten, bei denen der Laserstrahl in mindestens zwei Teilstrahlen aufgespalten wird, kann man das Objekt besser ausleuchten und die Intensitäten von Objekt- und Referenzstrahl aufeinander abstimmen. Allerdings sind diese Versuchsanordnungen etwas langwieriger aufzubauen und zu justieren. Da auch die Einstrahl-Aufbauten gute Ergebnisse liefern, werden wir diese im Folgenden verwenden.

Für die Erstellung eines Hologramms wird ein Laser benötigt. Er sollte gleich zu Beginn des Versuchs eingeschaltet werden, da es einige Zeit dauert, bis er warmgelaufen ist. Schaltet man den Laser erst unmittelbar vor der Aufnahme an, kann das zu unerwünschten Interferenzerscheinungen, also Streifen im fertigen Hologramm, führen. Der Laserstrahl hat nur einen Querschnitt von wenigen Quadratmillimetern. Er wird von einer Sammellinse auf einen Strahldurchmesser von einigen Zentimetern aufgeweitet, um den gesamten Film belichten zu können. Die Leistung des Lasers beträgt 10mW. Ein sogenannter Raumfilter (auch Pinhole genannt) filtert störende Interferenzerscheinungen heraus, die durch Verschmutzungen der Bauteile oder durch Linsenfehler zustande kommen können.

Achtung! Der Laser ist gefährlich für eure Augen! Ihr solltet es unbedingt vermeiden, direkt in den Strahl zu blicken! Am besten zieht ihr Schmuck und Uhren aus, damit der Laserstrahl nicht davon in eure Augen reflektiert wird.

Der Holografiefilm wird zwischen zwei Glasplatten in einer Halterung eingespannt, auf der auch das Objekt mit etwas Knete befestigt werden kann. Wir holografieren im Schülerlabor wegen der verwendeten Filmgröße Objekte, die einige Zentimeter groß sind. Sie sollten möglichst stabil sein, weil sie sich bei der Belichtung nicht verformen oder bewegen dürfen.



Abbildung 1: Zur Holografie verwendete Objekte



Am besten eignen sich helle (beispielsweise weiße oder glänzende) Objekte, deren Querschnitt nicht zu klein ist und die nicht zu stark abgerundet sind. Könnt ihr euch vorstellen, warum das so ist?

Im Schülerlabor können mit zwei unterschiedlichen Aufbauten Transmissions- oder Reflexionshologramme erstellt werden. In beiden Fällen wird die Film- und Objekthalterung möglichst weit entfernt vom Laser aufgestellt, um eine gleichmäßige Ausleuchtung zu erreichen. Das Objekt wird, je nachdem, ob ein Transmissions- oder ein Reflexionshologramm erstellt werden soll, vor oder hinter dem Film aufgestellt.

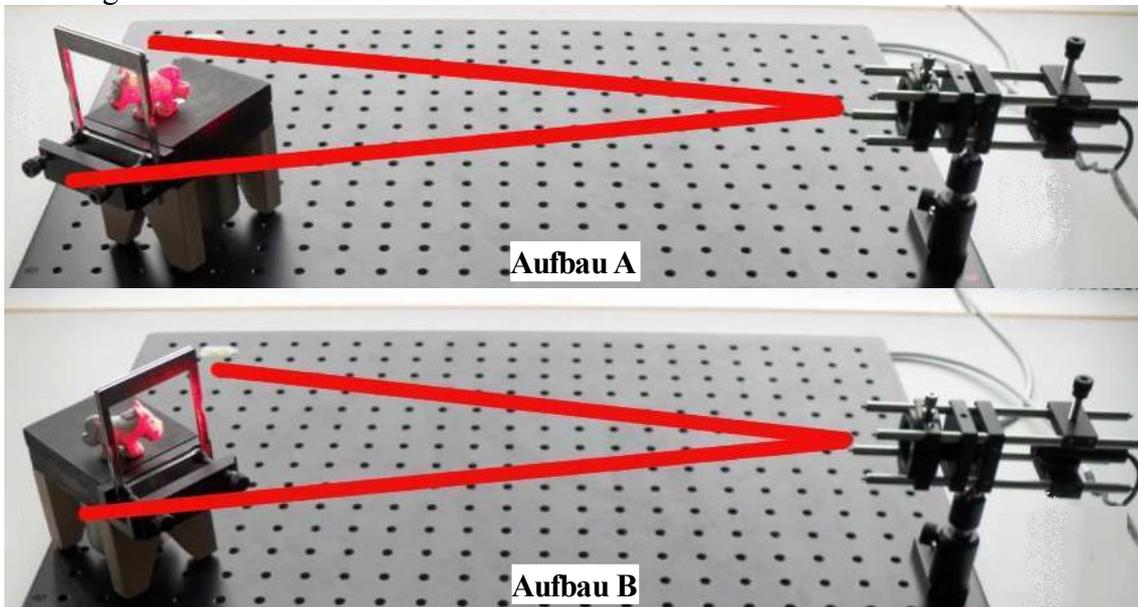


Abbildung 2: Einstrahl-Aufbauten

Welche Objektposition (Aufbau A oder B) entspricht welchem Hologrammtyp?



Abbildung 3:
Aufbau mit Spiegel

Wird das Objekt vor dem Film aufgestellt, so wirft es eventuell einen Schatten darauf. Dies ist der Qualität des Hologramms abträglich, da der Film an dieser Stelle nicht belichtet wird. Es ist daher empfehlenswert, einen Spiegel direkt neben der Filmhalterung zu positionieren und den Laserstrahl so einzustellen, dass er zur Hälfte auf den Film und zur anderen Hälfte auf den Spiegel trifft. Vom Spiegel aus beleuchtet damit eine Hälfte des Laserstrahls das Objekt so, dass es optimal ausgeleuchtet wird, ohne einen Schatten auf den Film zu werfen.

Der Winkel zwischen Filmebene und Laserstrahl sollte etwa 33° betragen, da dies gerade dem Brewster-Winkel entspricht.



Fällt eine unpolarisierte elektromagnetische Welle unter dem Brewster-Winkel α_B auf den Übergang zwischen zwei Medien, so wird dadurch die reflektierte Welle linear polarisiert. Die Wellenvektoren des reflektierten Anteils verlaufen nur senkrecht zur Einfallsebene.

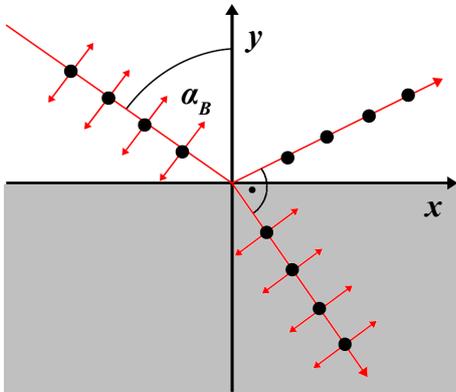


Abbildung 4: Brewster-Winkel

Das Licht muss bei der Aufnahme eines Hologramms zuerst eine Glasplatte durchlaufen, um den Film zu beleuchten. Reflexionen an der Oberfläche der Glasplatte können zu störenden Interferenzerscheinungen oder zu Intensitätsverlusten führen. Durch die Einstellung des Brewsterwinkels können wir diese Reflexionen minimieren: Laserlicht ist zwar üblicherweise bereits linear polarisiert, allerdings ist diese Polarisation nie ideal. Die Polarisationssebene des Laserlichts ist so eingestellt, dass der größte Teil des Lichts bereits parallel zur Einfallsebene polarisiert ist und daher vollständig gebrochen wird. Damit ist der Anteil des Lichts, der senkrecht zur Einfallsebene polarisiert ist und reflektiert wird, wie gewünscht nur sehr klein.

Der Brewster-Winkel muss nicht ausgemessen, sondern kann experimentell ermittelt werden: Fängt man die Reflexion des Laserstrahls an einer Glasplatte in der Filmhalterung auf einer Pappe auf, so verändert sich deren Helligkeit mit dem Winkel zwischen Platte und Laserstrahl. Bei welcher Helligkeit ist der Brewster-Winkel erreicht? Warum?

Sind die Aufbauten justiert, kann der Film mit dem Laser belichtet und somit ein Hologramm erstellt werden. Dies muss in Dunkelheit geschehen, damit nur das gewünschte Interferenzmuster auf dem Schirm abgebildet wird.

Nach der Entwicklung des Films kann ein Transmissions-Hologramm rekonstruiert werden, indem man es mit Laserlicht bestrahlt, das aus der gleichen Richtung einfällt und die selbe Wellenlänge besitzt wie die Referenzwelle bei der Aufnahme.

Wie würdet ihr ein Reflexions-Hologramm rekonstruieren?



Entwicklung eines Holografiefilms

Hologramme werden, ähnlich wie Fotografien, in einer lichtempfindlichen Emulsion aufgenommen, die auf eine Kunststoff-Folie aufgetragen ist. Die Emulsion besteht aus Silberhalogenid-Kristallen, also Ionenbindungen von Silber und einem Halogen (Ag^+Br^- , Ag^+Cl^- oder Ag^+I^-), die in einer Gelatineschicht eingebettet sind. Fällt Licht auf die Emulsion, so verändert sie sich: Die auftreffenden Photonen werden von den Kristallen absorbiert. Die dadurch aufgenommene Energie führt dazu, dass die Kristalle sich in sogenannte Latentkeime umwandeln. Je höher die Intensität des Lichtes an einer Stelle der Emulsion ist, desto stärker ist diese Keimbildung, es entsteht ein sogenanntes Latentbild, das dem Muster des Intensitätsverlaufs entspricht.

Um das bei der Belichtung in der Folie entstehende Latentbild sichtbar zu machen, wird der Film nach der Belichtung einem Entwicklerbad ausgesetzt, das die Silber-Ionen der Kristalle zu metallischem Silber umwandelt. Dieser Prozess kann nur dort starten, wo sich bereits Latentkeime gebildet hatten, und breitet sich dann von diesen Stellen über die gesamte Emulsion aus. Das metallische Silber ist lichtundurchlässig, wirkt also, wenn man durch den Film blickt, schwarz.

Nach dem Entwicklerbad wird der Film in ein Stoppbad getaucht, das den Schwärzungsprozess abbricht. Meist besteht das Stoppbad aus einer Säure, die den basischen Entwickler neutralisiert.

Könnt ihr euch vorstellen, warum dieses Stoppbad nötig ist? Was passiert, wenn man den Entwicklungsprozess nicht unterbricht?

Beim Eintauchen ins Stoppbad könnt ihr die Qualität des Entwicklers kontrollieren: Ist er in noch brauchbar, dann solltet ihr beobachten können, dass der Film kurz aufleuchtet, wenn er mit dem Stoppbad in Berührung kommt. Dies liegt daran, dass ein wichtiger Stoff im Entwickler, das Pyrogallol, mit der Säure reagiert, wobei Energie in Form von Licht frei wird. Man nennt diesen Vorgang Chemolumineszenz. Steht der Entwickler zu lange offen, dann reagiert das Pyrogallol mit dem Sauerstoff in der Luft und wandelt sich dabei in andere Stoffe um. Es wirkt dann nicht mehr im Entwickler und es tritt auch keine chemolumineszente Reaktion mit Säure mehr auf.

Das dritte benötigte Chemikalienbad zur Filmentwicklung ist das Bleichbad. Hier werden die metallischen Silberatome wieder zu Ionen oxidiert, die sich dann mit den Halogeniden wieder zu Silberhalogenid-Kristallen verbinden. Während des Bleichvorgangs wandern die Silberionen allerdings aus den ursprünglich belichteten in die unbelichteten Bereiche des Hologramms. In den belichteten Bereichen sind die Silberhalogenid-Kristalle daher am Ende des Bleichvorgangs viel kleiner als in den unbelichteten. Der Film ist dadurch zwar im Ganzen wieder transparent, allerdings variiert der Brechungsindex des Materials durch die Kristallgröße. Vom Entwickler geschwärzte Stellen, an denen hohe Lichtintensität herrschte, haben nun einen geringeren Brechungsindex als die Areale des Films, die geringerer Lichtintensität ausgesetzt waren. Das Intensitätsprofil des auftreffenden Lichts ist in ein Brechungsindex-Profil umgewandelt worden.



Der Film bleicht von den Rändern zur Mitte hin aus. Könnt ihr euch vorstellen, warum das so ist? (Tipp: Der Laser hat in seiner Strahlmitte eine höhere Intensität als in den Randbereichen.)

Als letztes wird der Film noch in einem Netzmittelbad ausgeschwenkt. Dies reduziert die Oberflächenspannung des Wassers und sorgt damit dafür, dass das Wasser und alle eventuell noch vorhandenen Chemikalienreste rückstandslos vom Holografiefilm ablaufen können und keine Schlieren oder Wasserflecken entstehen.

Bei der Herstellung von Reflexions-Hologrammen werden im Schülerlabor Filme benutzt, die mit Triethanolamin (kurz TEA) vorbehandelt wurden. Das Vorquellen mit dieser Substanz vergrößert die Dicke der Emulsion. Wird nach der Belichtung das TEA herausgewaschen, so rücken die Schichten im Hologramm mit niedrigerer Brechzahl enger zusammen.

Was bedeutet ein geringerer Abstand der reflektierenden Schichten im Hologramm für die Wellenlänge des rekonstruierten Bildes? Was hat die Vorbehandlung mit TEA demnach für Vorteile? (Tipp: Das menschliche Auge kann grünes Licht besonders gut aufnehmen. Es ist am empfindlichsten für Licht mit einer Wellenlänge von etwa 550nm.)

Zwischen den einzelnen Entwicklungsschritten lässt man den Film gut abtropfen und schwenkt ihn teilweise zusätzlich in destilliertem Wasser aus. Dies sorgt dafür, dass Reste der verschiedenen Entwicklungsflüssigkeiten ausgewaschen werden und nicht das nächste Chemikalienbad verunreinigen oder sich auf dem Film festsetzen. Bei vorgequollenen Filmen ist außerdem ein Wässerungsbad vor dem Entwicklerbad nötig, in dem das TEA ausgewaschen wird. Während der gesamten Zeit, die der Film in einem Chemikalien- oder Wässerungsbad verbringt, müsst ihr ihn in Bewegung halten, indem ihr ihn durch die Flüssigkeit schwenkt oder die Schale bewegt. Nur so kann vermieden werden, dass die Chemikalien sich auf ihm absetzen oder ungleichmäßig auf ihn einwirken.



Durchführung 1: Vorbereitungen

Bevor die eigentliche Aufnahme des Hologramms, also die Belichtung des Films stattfinden kann, müssen einige Vorbereitungen getroffen werden. Da der Raum, sobald der Film aus der Verpackung geholt wird, dunkel sein muss, ist es dann nur noch sehr schwer möglich, benötigte Dinge zu suchen, es sollte also schon alles bereitliegen.

Als erstes solltet ihr den Laser einschalten, damit dieser sich etwas warmlaufen kann.

Achtung! Der Laser ist gefährlich für eure Augen! Ihr solltet es unbedingt vermeiden, direkt in den Strahl zu blicken! Am besten zieht ihr Schmuck und Uhren aus, damit der Laserstrahl nicht davon in eure Augen reflektiert wird.

1. Entwicklungsstraße

Die verschiedenen Bäder zur Entwicklung des Films sollten schon zu Beginn des Versuchs ange-setzt bzw. bereitgestellt werden, damit die Chemikalien genug Zeit haben, sich vollständig aufzulösen. Tragt dazu Handschuhe. Alle Schalen sollten fast bis zur Hälfte gefüllt sein.

- Wiegt 3g Natriumkarbonat (Na_2CO_3), 0,5g Natriumsulfit (Na_2SO_3) und 0,5g Pyrogallol ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_3$) ab und löst alles in 100ml destilliertem Wasser in der **Entwicklerbad**-Schale auf.
- Gießt hellen Haushaltsessig in die **Stoppbad**-Schale.
- Füllt das bereits angemischte Bleichmittel aus Kaliumbromid, Kupfersulfat und Bernsteinsäure, gelöst in destilliertem Wasser, in die **Bleichbad**-Schale.
- Gebt einen Tropfen Netzmittel (AGEPON) in die **Netzmittelbad**-Schale und verdünnt ihn mit destilliertem Wasser.
- Für die drei **Wässerungsbäder** benötigt ihr nur destilliertes Wasser.

Stellt alle Schalen in folgender Reihenfolge auf:

Wässerungsbad - Entwicklerb. - Stoppb. - Wässerungsb. - Bleichb. - Wässerungsb. - Netzmittelb.



Abbildung 1: Entwicklungsstraße

Legt am Ende der Entwicklungsstraße saugfähiges Papier, Abzieher und ein frisches Paar Handschuhe bereit.



2. Strahl Aufbau

Reflexions-Aufbau:

Baut die Komponenten nach folgender Aufbauskitze auf:

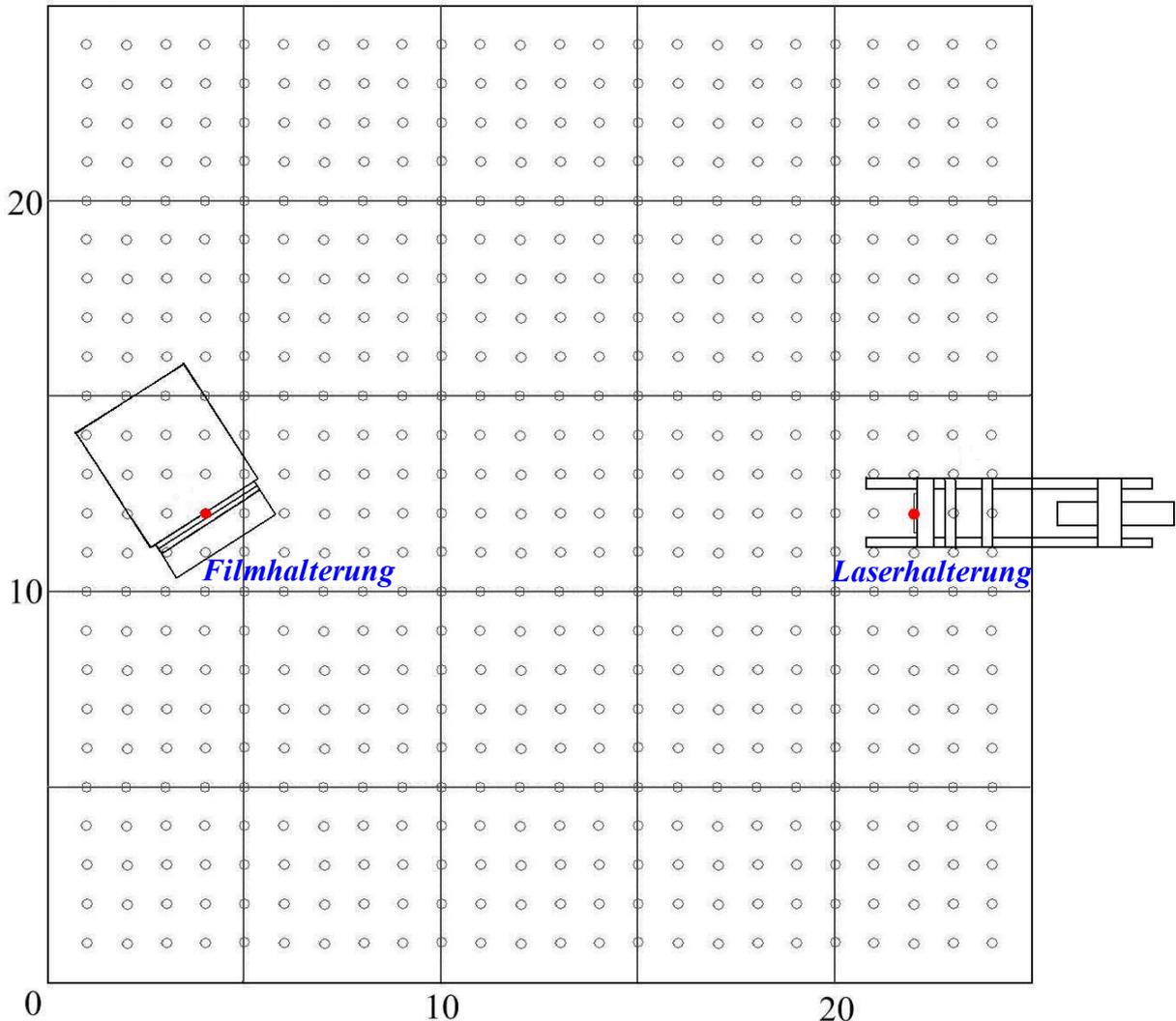


Abbildung 2: Reflexions-Einstrahl-Aufbau

Setzt zur Justierung die Glasplatten, zwischen denen später der Film eingespannt werden soll, in die Filmhalterung ein.

Benutzt die kleine bereitliegende Pappe, um den Brewster-Winkel einzustellen und den Laser so zu justieren, dass er die Filmhalterung mittig trifft.

Sucht euch ein Objekt aus, das ihr holografieren wollt, und befestigt es mit Knete auf der Objekthalterung (hinter dem Film). Achtet dabei darauf, dass das Objekt möglichst nahe an der Filmebene steht, damit möglichst viel des reflektierten Lichts dort aufgefangen wird. Um die Ausleuchtung und die spätere Position des Bilds auf dem Film zu kontrollieren schaut ihr am besten so auf die Filmhalterung, wie ihr später das Hologramm betrachten würdet (also aus Richtung des Lasers). Das Objekt sollte mittig auf den Film abgebildet werden und die Schattenbereiche sollten möglichst klein sein. Ihr könnt die Ausleuchtung durch Drehen des Objekts eventuell verbessern.



Transmissions-Aufbau:

Baut die Komponenten nach folgender Aufbauskitze auf:

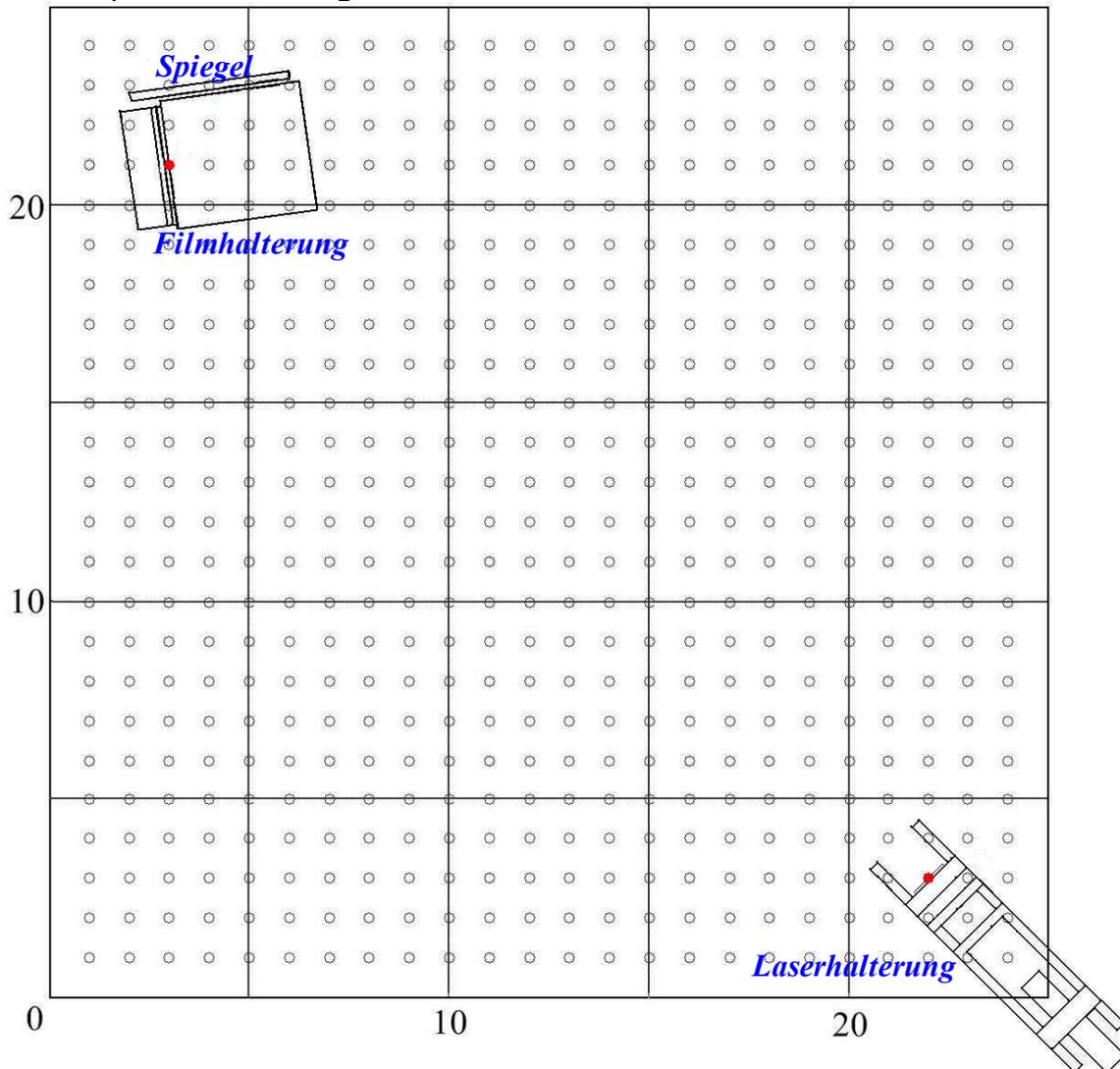


Abbildung 3: Transmissions-Einstrahl-Aufbau mit Spiegel

Setzt zur Justierung die Glasplatten, zwischen denen später der Film eingespannt werden soll, in die Filmhalterung ein.

Benutzt die kleine bereitliegende Pappe, um den Brewster-Winkel einzustellen und den Laser so zu justieren, dass der Strahlmittelpunkt den Rand der Filmhalterung trifft. Die Hälfte des Strahls sollte also auf die Filmhalterung, die andere Hälfte auf den Spiegel fallen.

Befestigt ein beliebiges Objekt mit Knete auf der Filmhalterung (vor dem Film). Ihr solltet dabei darauf achten, dass das Objekt keinen Schatten auf den Film wirft, sonst kann dieser an dieser Stelle nicht belichtet werden und die Qualität des Hologramms nimmt ab. Wenn ihr aus der Richtung auf die Film- und Objekthalterung schaut, aus der ihr später auch das fertige Hologramm betrachtet, könnt ihr kontrollieren, ob das Objekt mittig auf dem Film abgebildet und optimal beleuchtet wird. Dreht den Spiegel, um das Objekt möglichst vollständig auszuleuchten.



3. Abschließende Vorbereitungen

Nehmt die Glasplatten aus der Halterung und legt sie bereit, um später den belichteten Film darin einspannen zu können.

Blockiert den Laserstrahl mit der großen bereitliegenden Pappe, indem ihr sie einfach gegen die Laserhalterung lehnt. Der Strahl darf erst bei der Belichtung des Films wieder freigegeben werden.. Überprüft, ob alle Streulichtquellen im Raum (zum Beispiel die leuchtende Anzeige der Lasersteuerung) abgeklebt oder mit schwarzen Tüchern zugedeckt sind.

Stellt die Stoppuhr auf eine Minute ein. Merkt euch, wo der Start/Stop-Knopf ist, damit ihr sie später auch im Dunkeln benutzen könnt. Schaltet die Dunkelkammerbeleuchtung ein und schattet sie in Richtung des Experiments mit dem bereitgestellten Karton ab. Damit sind die Vorbereitungen für die eigentliche Aufnahme des Hologramms abgeschlossen.



Durchführung 2: Belichtung und Entwicklung

Sobald der Film aus der Verpackung genommen wird, muss der Raum abgedunkelt bleiben. Daher solltet ihr euch die folgenden Beschreibungen schon im Vorhinein genau durchlesen. Prägt euch vor allem die Ruhe-, Belichtungs- und Entwicklungsdauern gut ein, da ihr sie während der Belichtung bzw. Entwicklung nicht noch einmal nachschauen könnt. Zeiten unter einer Minute könnt ihr durch langsames Zählen abschätzen, für alle anderen könnt ihr die Stoppuhr benutzen. Bevor ihr nun mit der Belichtung des Films beginnt, solltet ihr als Endkontrolle folgende Liste durchgehen:

- Ist der **Laser** eingeschaltet?
- Sind die **Chemikalien- und Wässerungsbäder** angesetzt und bereit gestellt?
- Liegen **saugfähiges Papier, Abzieher und Handschuhe** bereit?
- Sind alle notwendigen Komponenten des **Strahlaufbaus** aufgestellt und justiert?
- Ist das **Objekt** optimal positioniert und ausgeleuchtet?
- Liegen die **Glasplatten** bereit, um den Film einzuspannen?
- Ist der Laserstrahl **blockiert**?
- Sind alle **Streulichtquellen** abgedeckt?
- Ist die **Stoppuhr** auf eine Minute gestellt und bereitgelegt?
- Ist die **Dunkelkammerbeleuchtung** eingeschaltet und abgeschattet?

Um zu vermeiden, dass eure Aufnahme gestört wird, solltet ihr das Hinweisschild, das im Praktikumsraum bereit liegt, an die Tür kleben. Schaltet jetzt das Deckenlicht aus. Es wird erst wieder eingeschaltet, wenn die Filmentwicklung abgeschlossen ist.

1. Belichtung

Wenn sich eure Augen etwas an die Dunkelheit gewöhnt haben, könnt ihr einen Film aus der Verpackung nehmen und zwischen den Glasplatten einsetzen. Die konkav, also nach innen gekrümmte Seite des Films ist diejenige, auf der die Emulsion aufgetragen ist. Für ein Reflexionshologramm verwendet ihr am besten einen mit TEA vorbehandelten Film. Hier ist eine Ecke abgeschnitten. Ist diese rechts unten und zeigt dabei die längere Seite der Ecke nach unten, so seht ihr die Emulsionsseite des Films an. Achtet darauf, dass die Ränder des Films mit den auf den Glasplatten aufgetragenen Markierungen übereinstimmen. Setzt die Glasplatten so in die Filmhalterung ein, dass die Emulsionsseite des Films in Richtung des Objekts zeigt.

Die Versuchsanordnung muss jetzt einige Minuten ruhen. Schaltet dazu am besten auch die Dunkelkammerbeleuchtung aus. Das Ruhen ist nötig, weil schon kleinste Verschiebungen des Films in der Halterung während der Aufnahme zu Fehlstellen im fertigen Hologramm führen. Nach **drei bis fünf Minuten**, während der weder die Anordnung, noch der Experimentiertisch berührt werden darf, ist der Film komplett in Ruhe und ihr könnt mit der Belichtung beginnen.



Schaltet zur Belichtung des Films die Dunkelkammerbeleuchtung (nicht das Deckenlicht!) auf schwacher Stufe wieder ein, damit ihr nicht versehentlich an den Aufbau stoßt. Falls das passiert, muss der Film wiederum einige Minuten ruhen. Hebt die Pappe ganz vorsichtig an, ohne irgendeine der Komponenten eures Aufbaus zu berühren. Entfernt sie aber noch nicht aus dem Aufbau, sondern haltet sie so frei in der Luft, dass der Laserstrahl blockiert bleibt. Diese Wartezeit sorgt dafür, dass Schwingungen, die durch das Bewegen der Pappe im Aufbau entstehen, komplett abklingen können, bevor die Belichtung des Films beginnt. Nach etwa **20 Sekunden** könnt ihr die Pappe (natürlich ohne irgendetwas zu berühren) vollständig aus dem Aufbau entfernen und damit die Belichtung starten. Während der Belichtung solltet ihr euch nicht bewegen.

- **Reflexionshologramm**: Belichtungszeit etwa 8 Sekunden
- **Transmissionshologramm**: Belichtungszeit etwa 15 Sekunden

Am Ende der Belichtungszeit stellt ihr die Pappe genauso vorsichtig wieder an ihren Platz zurück, wie ihr sie herausgenommen habt. Ihr könnt nun die Glasplatten vorsichtig aus der Halterung entfernen. Passt auf, nicht versehentlich die Pappe umzustoßen, die den Laserstrahl blockiert.



2. Entwicklung

Zieht euch die bereitgelegten Handschuhe an und befreit den Film von den Glasplatten. Er wird jetzt der Reihe nach mit der Emulsionsseite (also der Seite, die dem Objekt zugewandt war) nach unten in die verschiedenen Bäder gelegt. Denkt daran, den Film bzw. die Flüssigkeit ständig zu bewegen und ihn zwischen den einzelnen Bädern gut abtropfen zu lassen.

- **1. Wässerungsbad: 1 Minute**
Dieser Schritt ist nur notwendig, wenn ihr einen vorgequollenen Film benutzt, um das TEA auszuwaschen. Bei unbehandelten Filmen entfällt er.
- **Entwicklerbad:** erste Kontrolle spätestens nach *30 Sekunden*
 - **Reflexionshologramm:** Ende bei *70-80% Schwärzung*
 - **Transmissionshologramm:** Ende bei *20% Schwärzung*Nehmt zur Kontrolle der Schwärzung den Film aus dem Bad und betrachtet durch ihn das rote Licht an der Energieversorgung der Dunkelkammerbeleuchtung. Bei 70%-80% Schwärzung sollte die Leuchte kaum noch wahrnehmbar, bei 20% Schwärzung gut sichtbar, aber deutlich dunkler sein. Kontrolliert die Schwärzung des Films nicht zu oft, wenn der Film alle paar Sekunden aus dem Entwicklerbad genommen wird, kann dies zu Schlieren und einer ungleichmäßigen Entwicklung führen.
- **Stoppbad:** mindestens *1 Minute*
Achtet beim Eintauchen auf die Chemolumineszenz, um die Qualität des Entwicklers zu überprüfen.
- **2. Wässerungsbad: 2 Minuten**
Ab diesem Punkt kann die Dunkelkammerbeleuchtung wieder heller gedreht werden. Auch die Abschattung ist nicht mehr nötig.
- **Bleichbad:** Ende *10-20 Sekunden* nachdem die *letzte schwarze Stelle verschwunden* ist
Beobachtet den Film, während er im Bleichbad ist, um den richtigen Zeitpunkt zum Herausnehmen nicht zu verpassen. Achtet hier besonders darauf, den Film bzw. die Flüssigkeit in Bewegung zu halten.
- **3. Wässerungsbad: 3-5 Minuten**
- **Netzmittelbad: 30 Sekunden**

Um die Trocknungszeit des Films zu verkürzen, wird er nach dem Durchlaufen der Entwicklungsstraße mit der Emulsionsseite nach oben auf ein saugfähiges Tuch gelegt. Haltet den Film vorsichtig ganz am Rand fest und streift mit sehr leichtem Druck mit dem Abzieher die Flüssigkeit ab. Dann stellt ihr den Film auf ein saugfähiges Tuch.

Nach etwa 15 Minuten sollte der Film getrocknet sein und ihr könnt euer fertiges Hologramm betrachten. Beleuchtet dazu euer Transmissions-Hologramm mit einem Laser der Wellenlänge 635nm in einem Winkel von 33° (ihr könnt das Hologramm auch wieder in den Aufbau einsetzen). Das Reflexions-Hologramm könnt ihr mit der Weißlicht-Leuchte im Praktikumsraum ebenfalls unter einem Winkel von 33° betrachten.