

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Physikalische Grundlagen	2
2.1	Die Wellennatur des Lichts	2
2.2	Kohärentes Licht, Beugung und Interferenz	2
2.3	Bragg-Reflektion	4
2.4	Der Laser	4
2.4.1	Absorbtion und Emission	4
2.4.2	Besetzungsinversion	5
2.4.3	Drei-Niveau-Laser	5
2.4.4	Technische Umsetzung	5
3	Das Hologramm	6
3.1	Holographie und Fotografie	6
3.2	Fresnel Zonenplatte	6
3.3	Transmissionshologramme	7
3.4	Reflektionshologramme	8
3.5	Weißlichthologramme	8
3.5.1	Regenbogenhologramme	9
3.5.2	Prägehologramme	9
3.6	Volumenhologramme	10
3.7	Holographische Anwendungen	10
3.7.1	Hologramme als Sicherheitsmerkmal	10
3.7.2	Holographische Interferometrie	10
3.7.3	Holographische Datenspeicher	11
4	Versuchsdurchführung	11
4.1	Versuchsaufbau	11
4.2	Aufnahme und Entwicklung	12
4.3	Resultat	13
5	Fragen und Antworten	14
6	Verzeichnisse	14
6.1	Abbildungsverzeichnis	14
6.2	Literaturverzeichnis	15

1 Einleitung

Dennis Gábor versuchte 1948 mit einer zweistufigen Anordnung das Auflösungsvermögen von Mikroskopen zu vergrößern. Unbewusst legte er damit den Grundstein für die Herstellung von Hologrammen. Gábor gelang es zu zeigen wie sich Informationen über die Phasen des Zwischenbildes mittels Überlagerung von Objektwelle mit einer Referenzwelle direkt und photographisch festgehalten werden konnten. Allerdings fehlten Gábor die technischen Voraussetzungen seine Theorie effektiv in die Praxis umzusetzen. Acht Jahre später gelang es zwei amerikanischen Wissenschaftlern auf der Grundlage Gábors Theorie die ersten dreidimensionalen Abbildungen von Objekten zu erzeugen. Mit Hilfe des neu erfundenen Lasers gelangen den beiden Forschern weitere erfolgreiche holographische Versuche.

2 Physikalische Grundlagen

Die physikalischen Eigenschaften von Licht sind die Grundlage für die Erzeugung von Hologrammen. Im Folgenden sollen die für das Verständnis von Hologrammen wichtigen physikalischen Grundlagen genannt werden.

2.1 Die Wellennatur des Lichts

Ende des 19. Jahrhunderts wurde die von Christiaan Huygens schon im 17. Jahrhundert vermutete Wellennatur von Licht durch Versuch von Friedrich Hertz bestätigt. Dieser zeigte die von James C. Maxwell vermutete Analogie von Licht und elektromagnetischen Wellen. Das sichtbare Licht verhält sich also wie elektromagnetische Wellen. Bestätigt wurden der Wellencharakter von Licht mit Interferenz und Beugungsversuchen an dünnen Schichten und optischen Gittern.

2.2 Kohärentes Licht, Beugung und Interferenz

Zwei Lichtwellen werden als kohärent bezeichnet, wenn sie bis auf eine konstante Phasendifferenz durch die gleiche Wellenfunktion beschrieben werden können (vgl. Abb.(1)). Anders ausgedrückt sind kohärente Lichtwellen in der Lage stationäre Interferenzerscheinungen hervorzurufen. Eine unendlich ausgedehnte, monochromatische Kugelwelle einer Punktlichtquelle ist perfekt kohärent. Allerdings kommt dies in der Natur nicht vor und ist auch technisch nicht umsetzbar. Eine reale Lichtquelle erzeugt Licht mit einer gewissen Kohärenzlänge. Dies bezeichnet den maximalen Gangunterschied, den zwei zum gleichen Zeitpunkt emittierten Lichtstrahlen haben können um noch Interferenzerscheinungen hervorzurufen. Die Kohärenzlänge von thermisch erzeugtem Licht ist mit $L \approx 0.3\mu m$ sehr gering.

Kohärentes Licht kann durch den Einsatz eines Spaltes erzeugt werden. Nach dem Huygensschen Prinzip kann jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer Elementarwelle angesehen werden. Fällt Licht nun auf einen Spalt mit einer Spaltbreite im Bereich der Wellenlänge, so wirkt die Wellenfront, die den Spalt passiert als Ausgangspunkt einer Radialwelle, das Licht wird am Spalt gebeugt. Die entstandene Lichtwelle besitzt eine gute räumliche Kohärenz. Räumliche Kohärenz beschreibt die Kohärenz zweier Ortspunkte in Abhängigkeit deren Abstands senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichts. Neben den

Punktlichtquellen erzeugen auch weit entfernte Lichtquellen Licht mit guter räumlicher Kohärenz.

Die räumliche Kohärenz ist nicht mit der Kohärenzlänge zu verwechseln. Die Kohärenzlänge

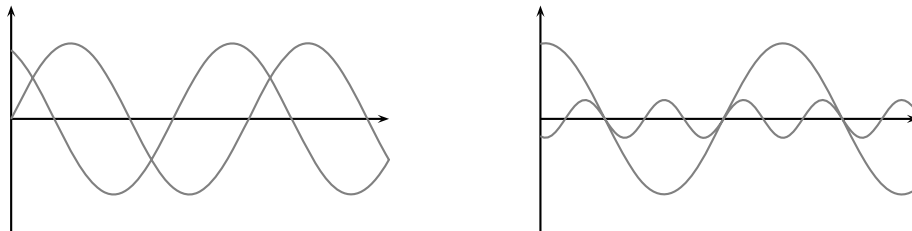


Abbildung 1: *Verdeutlichung der Phasenbeziehung kohärenter Wellen. Die Wellenfunktionen des linken Schaubildes stimmen bis auf eine konstante Phasendifferenz überein, während die Wellenlängen der rechts dargestellten Wellenzüge variieren.*

lässt sich in die Kohärenzzeit, die maximale Zeitspanne während sich in einem festen Raumpunkt die Phasendifferenz höchstens um 2π ändert, umrechnen. Analog werden zwei Teilwellen als zeitlich kohärent bezeichnet, wenn sich ihre Phase in einem Zeitraum nicht mehr als um 2π ändert. Die von zwei Spalten ausgehenden Lichtwellen sind zeitlich kohärent.

Die Überlagerung von mehreren (Teil-)Wellen nach dem Superpositionsprinzip wird als Interferenz bezeichnet. Haben die Wellen die gleiche Frequenz und Amplitude, so kann es an einem bestimmten Raumpunkt zu einer Verstärkung (konstruktiver Interferenz bei gleicher Phase) oder kompletten Auslöschung (destruktiver Interferenz bei einer Phasendifferenz von π) der resultierenden Amplitude kommen (siehe Abb.(2)). Die stationäre Interferenz bezeichnet hierbei die zeitliche Unabhängigkeit der Raumpunkte mit konstruktiver oder destruktiver Interferenz. Bei der Überlagerung kohärenter Lichtwellen kommt es zur Interferenz. So beobachtet man an einem Schirm hinter einem Doppelspalt (zwei kohärente Lichtquellen) Minima und Maxima der Intensität. Hierbei ist ein Gangunterschied der Lichtstrahlen aus den verschiedenen Spalten für die Phase des Lichts verantwortlich.

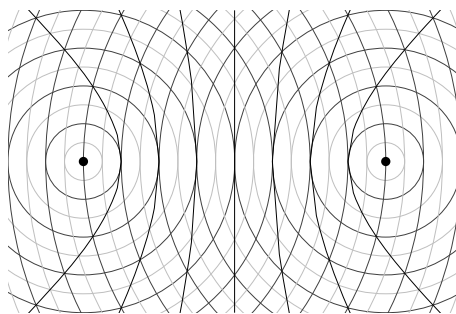


Abbildung 2: *Interferenz von konzentrischen Wellen. Die Amplitude der resultierenden Welle wird auf den schwarz eingezeichneten Linien maximal. Die Wellenberge sind hier dunkel dargestellt. Idee zur Grafik:[WPEnz]*

2.3 Bragg-Reflektion

Die Bragg-Reflektion beschreibt ein Phänomen im Zusammenhang mit elektromagnetischen Strahlungen und deren Verhalten an regelmäßigen Strukturen, wie Kristallen. Hierbei entsteht durch die Reflektion an unterschiedlichen Schichten in einem Kristall ein Interferenzmuster. Im Falle einer konstruktiven Interferenz gilt für die reflektierten Strahlen die Braggsche Bedingung:

$$2d \sin(\theta) = n \cdot \lambda \quad n \in \{1, 2, 3, \dots\} \quad (1)$$

Hierbei ist die Größe d der Netzaabstand der Gitterebenen im Kristall, θ der Reflektionswinkel und λ die Wellenlänge der reflektierten Strahlung. Abbildung (3) verdeutlicht die Braggsche Reflektion.

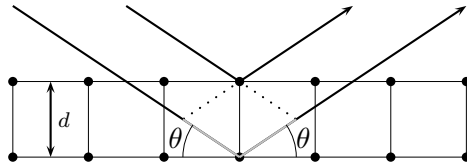


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Bragg-Reflektion. Aus [RTGEm]

Die Bragg-Reflektion ist für die Erklärung der Rekonstruktion von Reflektionshologrammen wichtig.

2.4 Der Laser

Heute werden für die Aufnahme und teilweise auch für die Rekonstruktion Laser genutzt. Ein Laser bietet gegenüber einer herkömmlichen thermischen Lichtquelle mehrere Vorteile. Laser besitzen eine sehr hohe Kohärenzlänge, so dass sich auch noch in einiger Entfernung Interferenzen bilden können. Die durch den Laser emittierten Lichtwellen haben alle nahezu identische Wellenlängen, ein Laser emittiert also nahezu monochromatisches Licht. Eine optische Apparatur zum Bündeln der Lichtstrahlen ist bei einem Laser nicht nötig, der Laser erzeugt nahezu parallele Strahlung.

Die Erzeugung von Laserlicht beruht auf der induzierten (stimulierten) Emission von Licht. Selbst die Abkürzung „Laser“ weist darauf hin: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

2.4.1 Absorption und Emission

Durch die Zufuhr von Energie kann in einem Atom ein Elektron von seinem Grundzustand (E_1) in einen höheren Energiezustand (E_2) überführt werden. Die dafür notwendige Energie kann durch die Absorption einer elektromagnetischen Welle aufgebracht werden. Das so angeregte Atom ist nun in der Lage die zusätzliche Energie wieder durch die Emission einer elektromagnetischen Wellen abzugeben. Dabei wird eine Welle mit einer diskreten Wellenlänge emittiert. Es ist:

$$E_2 - E_1 = \frac{h}{\lambda} \quad h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Bei freien Atomen erfolgt die Emission spontan, daher ist hierbei die Phase und die Polarität des Lichts zufällig. Bringt man allerdings die angeregten Atome in eine Lichtfeld mit geeigneter Wellenlänge, so wird die Emission durch eine der Lichtwellen stimuliert. Die emittierte Welle stimmt nun in Phase und Polarität mit der stimulierenden überein.

2.4.2 Besetzungsinversion

Ob ein Lichtfeld durch Emission verstärkt oder durch Absorption geschwächt wird, hängt in erster Linie davon ab, wie das Verhältnis der im angeregten Zustand (N_2) befindlichen Atome zu denen im Grundzustand (N_1) ist. Im thermischen Gleichgewicht überwiegt nach der Boltzmann-Verteilung der energetisch niedrigere Zustand. Es gilt:

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{-\frac{E_2-E_1}{k_B T}} \quad k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \quad (2)$$

Soll Licht durch die induzierte Emission verstärkt werden, so müssen mehr Atome im angeregten Zustand als im Grundzustand vorliegen. Der Besetzungszustand, bei dem die energetisch höheren Energieniveaus überwiegen, wird als Besetzungsinversion bezeichnet. Dieser Zustand ist in einem Zwei-Niveau-System höchst instabil. In der Praxis werden daher Laser mit einem Drei-Niveau-System (oder auch Mehr-Niveau-System) eingesetzt.

2.4.3 Drei-Niveau-Laser

Der Drei-Niveau-Laser zeichnet sich dadurch aus, dass das eingesetzte Medium drei energetisch unterschiedliche Elektronenkonfigurationen einnehmen kann. Sind nun die möglichen Energiezustände $E_1 < E_2 < E_3$ ist das Funktionsprinzip das Folgende: Die Atome werden durch Energiezufuhr in den höchst möglichen Energiezustand gebracht, also $E_1 \rightarrow E_3$. Dieser Zustand ist instabil, so dass die Atome sofort in den Energiezustand E_2 wechseln. Der Übergang $E_3 \rightarrow E_2$ verläuft meist strahlungslos. Die besondere Eigenschaft des Zustands E_2 ist, dass dieser metastabil ist, das heißt dass das Atom eine vergleichsweise lange Zeit ($\approx 10^{-3}s$) in dieser Konfiguration verharrt. Der Übergang $E_2 \rightarrow E_1$ findet darauf induziert statt.

2.4.4 Technische Umsetzung

Die klassischen Laser bestehen meist aus einem optischen Resonator, einer Anordnung aus zwei (halbdurchlässigen) Spiegeln, zwischen denen das Medium der Besetzungsinversion eingebracht wird. So verstärkt sich Strahlung innerhalb des Mediums durch induzierte Emission. Ein Teil der Strahlung kann nun durch den halbdurchlässigen Spiegel entweichen. Die für die Anregung der Atome nötige Energie kann von außen elektrisch in Form einer Gasentladung oder optisch durch Licht einer Gasentladungslampe zugeführt werden (Der Vorgang der Energiezufuhr wird als Pumpen bezeichnet). Auch chemische Reaktionen oder Elektronenstrahlen können zum Pumpen eingesetzt werden. Abbildung (4) zeigt den Aufbau eines Helium-Neon-Lasers.

In diesem Versuch wurde ein Diodenlaser genutzt. Hierbei kommt es bei Löchern am Übergang beim p und n dotierten Bereich zu der oben beschrieben induzierten Emission bei Rekombinationsprozessen. Mit teilreflektierenden Enden bildet das Halbleiterbauteil einen

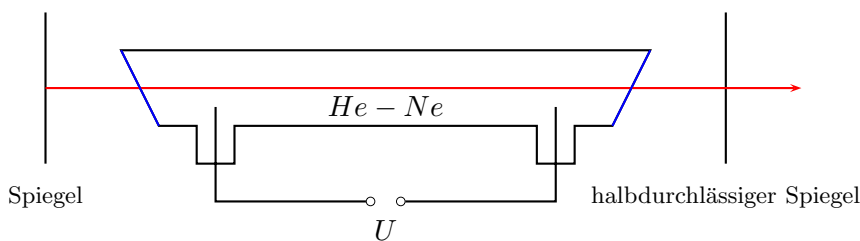


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines He-Ne Lasers. Eine Gasentladung bringt Helium-Atome in einen angeregten Zustand. Diese übertragen die Energie auf Neon-Atome. Von diesen wird nun das Licht emittiert. Eine Besonderheit sind die Blau gekennzeichneten Brewster-Fenster an den Enden der Röhre, die nur Licht einer bestimmten Polarisierung durchlassen. Aus [WPEnz]

optischen Resonator. Auch bei den Laserdioden wird die Besetzungsinversion durch elektrisches Pumpen erreicht. Dabei sorgt ein Gleichstrom in Durchlassrichtung für genügend Elektronen und Löcher.

3 Das Hologramm

Nach der Beschreibung der physikalischen Grundlagen soll nun im Folgenden auf das Prinzip der Holographie, das Aufnehmen und die Rekonstruktion von Hologrammen sowie auf die unterschiedlichen Arten von Hologrammen eingegangen werden.

3.1 Holographie und Fotografie

Mit der technischen Entwicklung der Fotografie Anfang des 19. Jahrhunderts war es erstmals möglich optische Informationen zu speichern. Mit der Entwicklung von Linsensystemen und kleineren Filmformaten setzte sich die Fotografie als Medium durch. Das Prinzip der Fotografie ist einfach zu verstehen. Durch Linsen wird von einem Objekt reflektiertes Licht auf eine fotochemisch aktive Schicht projiziert. Je nach Farbe und Intensität bewirkt das einfallende Licht eine Schwärzung der Fotoschicht. Ein (Schwarzweiß-) Foto enthält also Informationen über Intensität des vom Objekt reflektierten Lichts.

Die Holographie macht sich eine andere Eigenschaft des sichtbaren Lichts zu nutze. Bei der Holographie wird nicht die Intensität der vom Objekt reflektierten Lichtstrahlen gespeichert, sondern vielmehr die Phasenbeziehung der Lichtstrahlen. Für die Herstellung von Hologrammen wird, da bei einem Hologramm ein Interferenzmuster aufgezeichnet wird, kohärentes Licht benötigt. Die Aufnahme eines Hologramms ist demnach nicht wie die Fotografie im Freien möglich. Das Interferenzmuster entsteht bei einer Überlagerung der vom Objekt reflektierten Lichtwellen (im folgenden Objektwellen) und einer separaten zu den Objektwellen kohärenten Lichtwelle (im folgenden Referenzwelle).

3.2 Fresnel Zonenplatte

Die Fresnel Zonenplatte ist eine Platte auf der konzentrisch Zonen mit unterschiedlicher Transparenz oder optischer Weglänge angebracht sind. Betrachtet man den Fall der binären Zonenplatte auf dem Zonen mit vollständiger oder keiner Transparenz angebracht

sind, so werden einfallende Lichtwellen (mit entsprechender Wellenlänge) an den konzentrischen Spalten gebeugt. Hinter der Zonenplatte kann nun ein Interferenzmuster bestehend aus mehreren Maxima beobachtet werden. Interessanter ist der Fall einer nicht binären Verteilung der Transparenz. Besitzt die Zonenplatte einen sinusförmigen Kontrastwechsel, so entsteht hinter der Zonenplatte nur ein Brennpunkt. Die Fresnel Zonenplatte wird hauptsächlich zum fokussieren von Röntgenstrahlen eingesetzt, da herkömmliche Linsen aufgrund der Absorption sehr ineffektiv wären.

Die Fresnel Zonenplatte gewann durch die Entwicklung der Holographie eine ganz andere Bedeutung. Sie entspricht der holographischen Abbildung eines einzelnen Bildpunktes. Die Phaseninformation eines einzelnen Bildpunktes ist also in Form von konzentrischen Kontrastwechseln auf dem gesamten Hologramm verteilt. Dabei ist die Information über den Abstand des Bildpunktes zum Hologramm durch die Anordnung der Ringe gespeichert. Das abzubildende Objekt allerdings besteht nicht nur aus einem, sondern vielmehr unendlich vielen Bildpunkten. Ein Hologramm besteht somit aus unendlich vielen überlagerten Fresnel Zonen. Mit Hilfe der physikalischen Zusammenhänge der Fresnel Zonenplatte lassen sich die Interferenzmuster eines Hologramms für ein bestimmtes Objekt berechnen. Mit Hilfe eines Elektronenstrahlbelichters lassen sich so auch digital erzeugte Hologramme belichten.

Interessant ist die Tatsache, dass die Informationen eines Bildpunktes über das gesamte Hologramm verteilt liegen. Theoretisch ist es somit möglich das komplette Objekt aus nur einem Teil des Hologramms zu rekonstruieren. Praktisch verringert sich durch das Zerteilen die Auflösung der Rekonstruktion und der absehbare räumliche Blickwinkel.

3.3 Transmissionshologramme

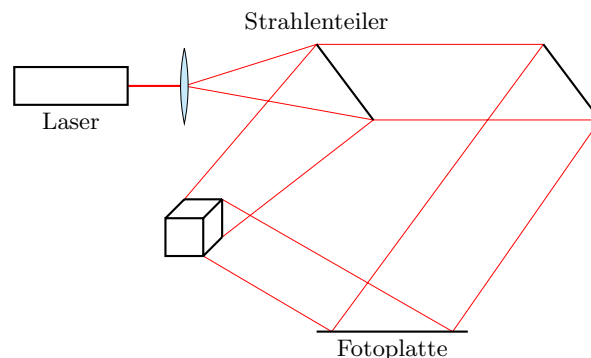


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Aufbauten bei der Belichtung eines Transmissionshologramms.

Zur Aufnahme eines Transmissionshologramms wird zum Aufzeichnen eines Hologramms eine Referenzwelle benötigt, die zur Objektwelle kohärent ist. Als Lichtquelle dient ein Laser. Nach der Auffächerung des Laserstrahl wird der Laserstrahl durch einen Strahlenteiler zum einen auf das abzubildende Objekt, zum anderen als Referenzwelle direkt auf die Fotoplatte gelenkt. Das vom Objekt reflektierte Licht bildet nun als Objektwelle mit der Referenzwelle ein Interferenzmuster, welches auf der Fotoplatte festgehalten wird. Dabei fallen Referenzwelle und Objektwelle von der gleichen Seite auf die Photoplatte.

Die Anordnung ist in Abbildung (5) schematisch dargestellt.

Zur Rekonstruktion wird das entwickelte Hologramm nur mit der Referenzwelle beleuchtet. Durch Beugung am aufgezeichneten Interferenzmuster entstehen so Lichtwellen, die identisch zu den ursprünglichen Objektwellen sind. Die so rekonstruierten Objektwellen enthalten alle Informationen, also auch die Phasenbeziehungen. Das aufgenommene Objekt kann nun an der Stelle, an dem es vorher stand durch den Film beobachtet werden.

3.4 Reflektionshologramme

Wie auch bei den Transmissionshologrammen wird bei Reflektionshologrammen ein Interferenzmuster von Objekt- und Referenzwelle aufgezeichnet. Allerdings treffen hier die Lichtwellen von unterschiedlichen Seiten auf die Fotoplatte. Abbildung (6) zeigt den Schematischen Aufbau zur Aufnahme eines Reflektionshologramms.

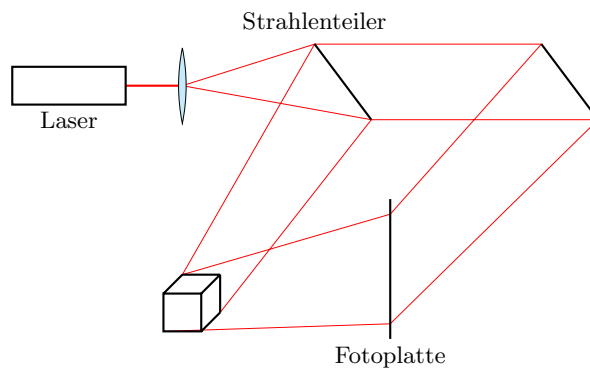


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Aufbauten bei der Belichtung eines Reflektionshologramms.

Zur Rekonstruktion eines Reflektionshologramms muss ähnlich wie bei den Transmissionshologrammen das Hologramm mit der Referenzwelle beleuchtet werden. Dabei wird durch Reflexion an der belichteten Fotoplatte die ursprüngliche Objektwelle rekonstruiert. Der Betrachter und die Lichtquelle stehen bei der Rekonstruktion auf der gleichen Seite des Hologramms.

3.5 Weißlichthologramme

Die oben beschriebenen Hologramme lassen sich nur durch die Beleuchtung mit der Referenzwelle rekonstruieren. Weißlichthologramme haben den Vorteil, dass für die Rekonstruktion eine inkohärente Lichtquelle verwendet werden kann. Sie machen eine Verbreitung von Hologrammen erst möglich.

Die Erzeugung der Weißlichthologramme beruht ebenfalls auf der Interferenz einer Objektwelle mit einer Referenzwelle. Allerdings fällt hier die Referenzwelle durch die Fotoplatte auf das abzubildende Objekt. Diese Anordnung nach Denisjuk wurde auch zur Herstellung des Hologramms im Versuch verwendet. Die durch die Überlagerung der Objekt- und Referenzwelle entstehenden Interferenzmaxima und -minima verlaufen hierbei nahezu parallel zur Oberfläche der Fotoplatte und führen, da die Fotoschicht der Platte um einiges dicker

ist als die Wellenlänge des verwendeten Lichts, zu einer Schichtstruktur der Schwärzung. Die Schichtung der Schwärzung des Photomaterials wirkt bei der Rekonstruktion des Hologramms ähnlich wie ein Kristallgitter bei der Bragg-Reflektion. Aus dem weißen Licht wird durch die Bragg-Bedingung bei der Rekonstruktion des Hologramms Lichts einer bestimmten Wellenlängen ausgewählt und reflektiert. Das abgebildete Objekt erscheint so nur unter einem gewissen Lichteinfallswinkel und einer bestimmten Farbe.

3.5.1 Regenbogenhologramme

Eine andere Art von Weißlichthologrammen sind Regenbogenhologramme. Auch sie können unter weißem Licht betrachtet werden. Je nach Blickwinkel ändert sich die Farbe des dargestellten Objekts. Zur Herstellung wird vom Objekt ein normales Lasertransmissionshologramm als Master benötigt. Ein Großteil des Masterhologramms wird nun durch eine geeignete Blende abgedeckt und beleuchtet. So wird eine Verringerung des Abbildungswinkels erreicht. Das hinter dem Hologramm entstehende reelle Abbild des Hologramms wird nun auf einer Photoplatte, ebenfalls mit einer Referenzwelle überlagert, aufgenommen.

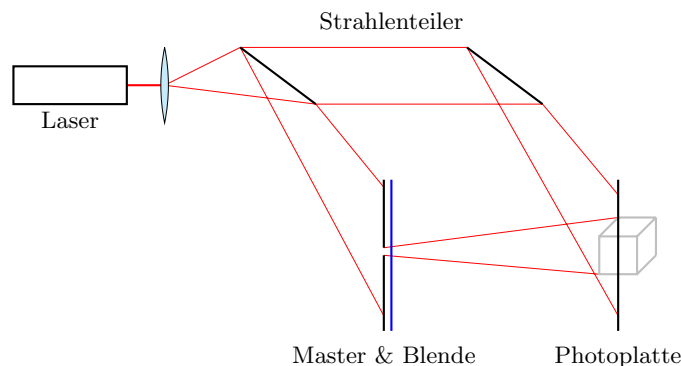


Abbildung 7: Schematische Darstellung zur Aufnahme eines Regenbogenhologramms.

Wird das so aufgenommene Hologramm mit monochromatischem Licht beleuchtet, so erscheint das abgebildete Objekt entsprechend der verwendeten Blende eingeschränkt. Außerhalb des Spaltes ist das Objekt nicht zu erkennen. Bei einer Beleuchtung mit einer anderen Farbe lässt sich das Spaltbild an einer anderen Stelle betrachten. Entsprechend entstehen bei einer weißen Beleuchtung gleichzeitig viele unterschiedlich gefärbte Schlitzbilder, die auf unterschiedlichen Höhen liegen und ineinander übergehen.

3.5.2 Prägehologramme

Die industrielle Herstellung von Regenbogenhologrammen ist optisch nicht möglich. Sollen große Stückzahlen eines Hologramms hergestellt werden, so eignet sich eine spezielle Prägetechnik. Wie bei der Herstellung der Regenbogenhologramme wird ein Objekt auf einem Transmissionslaserhologramm abgebildet und durch einen Spalt beleuchtet. Allerdings wird hierbei die Regenbogenkopie auf einem speziellen Aufnahmematerial belichtet. Dieses hochauflösende Material hat die Eigenschaft, dass sich auch die mikrofeinen holographischen Interferenzstrukturen zu einem Oberflächenrelief entwickeln lassen. Das Ober-

flächenrelief auf der Fotoplatte lässt sich nun galvanisch abformen. Die so hergestellten Nickelmatrizen dienen als Stempel, die die holographischen Strukturen in eine metallisierte Folie einprägen.

3.6 Volumenhologramme

Reflektionshologramme benötigen für die Aufzeichnung ein spezielles dickes Filmmaterial. Nur in Filmmaterialien, deren Dicke das Aufzeichnen von mehrschichtigen Interferenzmustern zulässt, ist es möglich durch Bragg-Reflektion ein holographisches Abbild eines Objekts zu rekonstruieren. Bei einem Volumenhologramm können sogar mehrere Bilder weitgehend ohne gegenseitige Störung aufgezeichnet werden. Durch Mehrfachbelichtung entsteht ein Multi- oder Vielfach-Hologramm. Für jedes einzelne Bild muss lediglich die Referenzwelle aus einer anderen Richtung und/oder mit einer anderen Divergenz auf die Fotoplatte fallen. Im Hologramm entstehen dabei für jedes Bild individuell geneigte Folgen von „Gitterpunkten“. Zur Rekonstruktion der einzelnen Bilder ist lediglich die Beleuchtung entsprechend der Aufnahme zu wählen. Auf diese Art lassen sich mehrere hundert Hologramme in einem Volumenhologramm speichern.

3.7 Holographische Anwendungen

Hologramme sind zweifelsohne schön anzusehende optische Phänomene. Neben der Anwendung als optische „Spielerei“ sind Hologramme als Sicherheitsmerkmal, bei Materialuntersuchungen oder als Datenspeicher zu finden.

3.7.1 Hologramme als Sicherheitsmerkmal

Oftmals begegnet man Hologrammen auf EC-Karten, Personalausweisen oder Geldscheinen. In der Tat sind Hologramme nahezu fälschungssicher. Sie können aufgrund der sehr feinen Strukturen nicht auf herkömmliche Weise kopiert werden. Die auf Geldscheinen und EC-Karten befindlichen Hologramme sind meist Prägehologramme, da sie in großer Stückzahl benötigt werden. Mit genügend großem Aufwand ließen sich allerdings auch diese Sicherheitsmerkmale in einem Verfahren wie die Originale herstellen.

3.7.2 Holographische Interferometrie

Mit der holographischen Interferometrie können kleinste Veränderungen (im Bereich der Wellenlänge des Lichts) an einem Objekt untersucht werden. Anders als bei der herkömmlichen Interferometrie wird hier kein Vergleichsobjekt benötigt. Das Objekt wird dabei zu verschiedenen Zeiten holographisch aufgezeichnet. Bei der Rekonstruktion scheinen die aufgenommenen Zustände gleichzeitig zu existieren, wodurch Interferenzphänomene entstehen.

Beim *Doppelbelichtungsverfahren* wird zunächst ein Hologramm eines Objekts angefertigt. Nach einer Verformung des Objekts wird die Fotoplatte nochmals mit dem gleichen Objekt belichtet. Bei der Rekonstruktion des Hologramms werden so beide Zustände des Objekts gleichzeitig rekonstruiert. Durch die Verformung erscheint das Objekt mit Interferenzstreifen überzogen. Aus der Lage und der Anzahl der Interferenzstreifen kann nun auf die Größe der Verformung geschlossen werden.

Mit dem *Zeitmittelverfahren* können periodisch schwingende Objekte untersucht werden.

Hierfür wird eine Belichtungszeit gewählt, die lang im Vergleich zur Periode der Schwingung ist. Das Objekt hält sich während der Schwingung an den Punkten maximaler Amplitude am längsten auf, so dass die an den Umkehrpunkten reflektierten Wellen stärker zur Belichtung des Hologramms beitragen. Diese Zustände werden bei der Rekonstruktion daher stärker sichtbar. Die entstehenden Interferenzmuster geben so Aufschluss über das Schwingungsverhalten des untersuchten Objekts, wobei auch Schwingungsamplituden im Bereich der verwendeten Wellenlänge nachgewiesen werden können.

Mit Hilfe des *Echtzeitverfahrens* lassen sich mehrere vergleichbare Objekte untersuchen. Dafür wird als erstes ein Hologramm des Objekts als Referenz hergestellt, entwickelt und wieder an die Stelle der Belichtung gebracht. Diese Repositionierung muss im Bereich der Wellenlänge des Lichts exakt vorgenommen werden. Das rekonstruierte Bild interferiert nun mit der Objektwelle. Somit ist ein Vergleich des Objekts im Originalzustand, gespeichert im Hologramm, mit dem veränderten Objekt möglich. Heute ist die Berechnung eines Hologramms für ein Objekt im Sollzustand möglich. Somit lassen sich an einem produzierten Objekt kleinste Abweichungen vom Sollzustand feststellen, ohne ein Referenzobjekt (welches ja auch von Sollzustand abweichen könnte) zu benötigen.

3.7.3 Holographische Datenspeicher

Der Holographische Datenspeicher wird heute als Nachfolger der BlueRay- oder HD-DVD-Speichertechnik gehandelt. Beide beruhen auf der Technik der heute üblichen CD/DVD, benutzen allerdings kürzere Wellenlängen zum Lesen, wodurch sich das Speichervolumen gegenüber den heutigen Medien auf bis zu $50GB$ vergrößert. Die HVD (Holographic Versatile Disc) benutzt zur Speicherung von Daten in Form eines Interferenzmusters eine holographische Schicht. Diese wird von einem blau-grünen Laser ausgelesen. Zur Positionierung der Lese-/Schreibposition werden Hilfsinformationen, die auf der HVD in einer gewöhnlichen CD-artigen Schicht gespeichert werden, benutzt. Der große Vorteil der Holographischen Datenspeicher ist, dass das gesamte Volumen des Datenspeichers zur Speicherung von Daten genutzt werden kann. Das selektive Auslesen ist dabei durch eine Rekonstruktion mit einer im richtigen Winkel positionierten Referenzwelle möglich. Auf einer HVD sollen bis zu $3.9TB \hat{=} 3993GB$ gespeichert werden können. Theoretisch ist die Speicherung einer maximalen Datenmenge von $4.9 \cdot 10^8 TB/cm^3$ möglich.

4 Versuchsdurchführung

Ziel dieses Versuchs war die Herstellung von einem Weißlichtreflektionshologramms. Bei der Aufnahme des Hologramms wurde eine Versuchsanordnung nach Denisjuk verwendet. Als Objekt diente hier ein Porzellanschweinchen.

4.1 Versuchsaufbau

Wie schon gesagt wurde bei der Versuchsanordnung die Methode der Denisjuk-Holographie genutzt. Abbildung (8) stellt den dazu nötigen Aufbau dar.

Anders als bei der Methode zur Herstellung eines Reflektionshologramms wird das vom Laser emittierte Licht nicht aufgeteilt, sondern nach der Strahlaufweitung durch die Photoplatte als Beleuchtung des Objekts genutzt. Die Objektwelle trifft dann von der anderen Seite auf die Platte. Die Referenzwelle dient nach dem Durchgang durch die Photoplatte

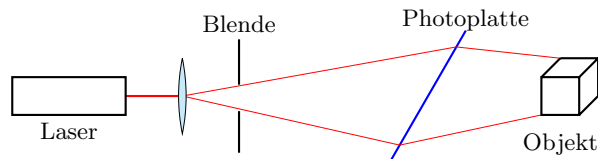


Abbildung 8: *Schematische Darstellung der im Versuch verwendeten Anordnung für die Aufzeichnung des Weißlichthologramms.*

also als Beleuchtung für das Objekt.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass außer einer Linse zur Strahlaufweitung keine weiteren optischen Apparaturen benötigt werden. Die eingezeichnete Blende dient zur Regulation der Belichtungszeit und kann bei Bedarf manuell geöffnet und geschlossen werden. Die gesamten optischen Aufbauten sind zur Vermeidung von Vibrationen durch Erschütterungen auf einem optischen Tisch aufgebaut. In diesem Fall besteht der optische Tisch aus einer schweren Metallplatte auf einer Schaumstoffmatte.

Vor der Belichtung des Hologramms sollten unbedingt alle mechanischen Störquellen von der Platte entfernt und einige Zeit bis zum Auslösen der Belichtung gewartet werden, damit eventuelle Schwingungen der Platte abklingen können. Das Stativ zur Befestigung der Belichtungsblende ist ebenfalls außerhalb des optischen Tisches anzubringen, da das sich beim Öffnen und Schließen der Blende kleine Erschütterungen nicht vermeiden lassen.

Als Laserquelle wurde im Versuch eine Laserdiode genutzt, die von den Spezifikationen dem in der Versuchsanleitung angegebenen Helium-Neon-Laser ähnelt. Benötigt die Laserlichtquelle ein externes Netzgerät, so sollte auch dieses zur Vermeidung von Vibrationen nicht auf der optischen Platte stehen. In diesem Experiment wurde die Laserdiode durch ein Steckernetzteil gespeist, so dass darauf keine Rücksicht genommen werden musste.

Als Filmmaterial wurde im Versuch ein spezieller Planfilm, der zwischen zwei Glasplatten gespannt wurde, als Photoplatte genutzt. Das verwendete Filmmaterial PFG-01 besitzt eine Auflösungsfähigkeit von 3000 Linien/mm. Die Photoplatte sollte unbedingt in einem Winkel zur optischen Achse stehen, da bei der Rekonstruktion des Hologramms der Winkel des einfallenden Lichts dem Einfallswinkel der Referenzwelle entsprechen muss. Steht die Photoplatte fast senkrecht auf der optischen Achse, so ist eine Rekonstruktion zwar möglich aber kaum zu beobachten, da sich der Beobachter vor oder hinter der Lichtquelle befinden müsste.

Um gute Ergebnisse zu erhalten sollte der Objektabstand möglichst gering gehalten werden und das Objekt durch den aufgeweiteten Laserstrahl gut beleuchtet werden.

4.2 Aufnahme und Entwicklung

Mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau wurden mehrere Filme belichtet. Auf den ersten Aufnahmen war allerdings auch mit gutem Willen nichts zu erkennen, dazu aber später mehr. Bei der Belichtung reagieren in der Fotoschicht des Films befindliche Silberionen mit einer Umwandlung in metallisches Silber. Die Belichtungszeit von ca. 6s wurde in diesem Versuch nach den Vorgaben der Versuchsbeschreibung gewählt.

Nach der Belichtung müssen die Filme entwickelt werden. Der erste Schritt nach der Be-

lichtung ist die Entwicklung des Films in einem speziellen Entwicklerbad. Dabei vergrößern sich die belichteten Strukturen durch den autokatalytischen Effekt des Entwicklers. Die Entwicklungszeit bestimmt im Allgemeinen den Kontrast des entstehenden Bildes. Eine zu kurze Entwicklung liefert ein sehr helles Bild, während eine zu lange Entwicklung den Film zu stark schwärzt. Hier wurden Entwicklungszeiten im Bereich von 20 – 40s gewählt. Das anschließende Stoppbad dient dazu die Entwicklung des Films zu stoppen, da sonst die fortschreitende Entwicklung den gesamten Film schwärzen würde. Im Versuch wurden die entwickelten Filme ca. 10s in das Stoppbad eingebracht.

Im anschließenden Bleichbad ist ein Verschwinden der im Entwickler aufgetretenen Schwärzung des Films zu beobachten. Der Bleichprozess macht den Film unempfindlich gegen weiteren Lichteinfall. Der entwickelte Film wurde nach den Angaben der Versuchbeschreibung für ca. 15s ins Bleichbad gebracht.

Nach dem Bleichbad ist der Film unbedingt eine längere Zeit zu wässern, um Rückstände des Bleichmittels aus der Fotoschicht des Films auszuwaschen. Die im Versuch entwickelten Hologramme wurden ca. 10min gewässert.

4.3 Resultat

Wie schon angedeutet waren die ersten Versuche ein Hologramm herzustellen nicht erfolgreich. Im Laufe der weiteren Aufnahmen wurden nach und nach unterschiedliche Veränderungen am Aufnahmeverfahren und den Zeiten der Entwicklung vorgenommen. Hier eine Zusammenstellung der Änderungen, die bei der letzten Aufnahme schließlich zum Erfolg führten:

- Die Fotoplatte wurde erst zur letzten Aufnahme zur optischen Achse gedreht. Auf den vorherigen Aufnahmen war das Objekt nicht zu erkennen, was durchaus daran liegen könnte, dass eine senkrechte Beleuchtung und Betrachtung nicht möglich ist.
- Die mechanische Blende zum Auslösen der Belichtung war bei den ersten Aufnahmen auf der optischen Platte positioniert. Das Auslösen der Blenden könnte zu einer Erschütterung geführt haben, die das Aufzeichnen des Interferenzmusters gestört haben könnte.
- Die für die Entwicklung des Filmes eingesetzte Entwicklerflüssigkeit war schon sehr alt, so dass eine wesentlich längere Entwicklungsdauer als die anfänglich benutzten 20s nötig war.

Mit den genannten Veränderungen gelang letztendlich die Aufnahme eines Hologramms. Auf dem Hologramm ist das abgebildete Porzellanschwein bei der Betrachtung mit der Kohlenbogenlampe zu erkennen. Eine Rekonstruktion mit Sonnenlicht oder anderen Punktlichtquellen, zum Beispiel einer Halogenlampe, ist nicht möglich. Zwar ist hier ein roter Schatten zu erkennen, aber nicht genau mit dem Objekt zu identifizieren.

Für die Herstellung eines besseren Hologramms müssten weitere Versuche zur Bestimmung der optimalen Belichtungszeit, die in diesem Versuch eventuell etwas zu kurz gewesen sein könnte, und Entwicklungszeit erfolgen. Die für die Entwicklung verwendeten Chemikalien werden zwar vom Hersteller des Films empfohlen, sollten aber bei entsprechendem Alter ausgetauscht werden.

5 Fragen und Antworten

Hier sollen die in der Versuchsanleitung gestellten Fragen beantwortet werden.

- 1.) Weshalb zeigt das rekonstruierte Bild eine andere als die Laserlichtfarbe?
Normalerweise zeigen Weißlichthologramme das Objekt in der Farbe des zur Aufzeichnung verwendeten Laserlichts. Bei der Entwicklung der Filme zieht sich allerdings die Fotoschicht des Filmmaterials zusammen. So werden auch die aufgezeichneten Interferenzmuster verkleinert, was bei der Rekonstruktion eine Farbveränderung zur kürzeren Wellenlänge bedeutet.
- 2.) Was passiert bei einer Mehrfachbelichtung?
Was bei einer Mehrfachbelichtung passiert, kommt auf jeden Fall auf die Ausrichtung der Referenzwelle an. Bleibt die Referenzwelle unverändert, so wird das erste und das zweite Objekt überlagert. Verändert man allerdings den Einfallswinkel der Referenzwelle können beide Hologramme unter unterschiedlichen Beleuchtungswinkeln betrachtet werden.
- 3.) Eine Methode zur Herstellung farbiger Reflektionshologramme.
So wie sich die mehrere Hologramme unter verschiedenen Winkeln in einen Reflektionshologramm speichern lassen, ist es auch möglich das gleiche Objekt im gleichen Winkel mit unterschiedlichen Wellenlängen nahezu störungsfrei in einem Hologramm zu speichern. Man muss hierfür das Objekt mit polychromatischem kohärenten Licht beleuchten. Bei der Rekonstruktion wählt das so entstehende Interferenzgitter die passenden Wellenlängen aus und rekonstruiert das Objekt in Realfarben. Allerdings müssen die verwendeten Hologrammfilme für alle verwendeten Wellenlängen die gleiche Sensibilität aufweisen und dürfen sich beim Entwickeln nicht zusammenziehen, was sonst mit tieferen Wellenlängen ausgeglichen werden müsste. Normalerweise werden farbige Hologramme mit einer Kombination aus Argon- bzw Helium-Neon-Lasern aufgenommen, da diese die benötigten Wellenlängen mit $488nm$, $515nm$ und $633nm$ erzeugen.

6 Verzeichnisse

6.1 Abbildungsverzeichnis

1	Kohärente Wellen	3
2	Interferenz von konzentrischen Wellen	3
3	Schematische Darstellung der Bragg-Reflektion	4
4	Schema eines He-Ne Lasers	6
5	Schema Transmissionshologrammbelichtung	7
6	Schema Reflektionshologrammbelichtung	8
7	Schema Regenbogenhologramm	9
8	Schema Holographieaufzeichnung nach Denisjuk	12

6.2 Literaturverzeichnis

- [WPEnz] Verschiedene *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie* <http://de.wikipedia.org>
- [Hal03] D.HALLIDAY, R.RESNICK, J.WALKER *Physik* WILEY-VCH GmbH&Co. KGaA
1.Auflage 2003
- [Dem04] W.DEMTRÖDER *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik* Springer-Verlag
3.Auflage 2004
- [APScript] B.RUNGE *Versuchsanleitung zur Holographie*
- [RTGEm] A.HASENKAMPF,T.LORENZ *Protokoll zum Emissionsspektrum von Röntgenstrahlen*