

Physikalisches Anfängerpraktikum an der Universität Konstanz: **Holographie**

Experiment durchgeführt am 26.10.2004

Jan Korger, Studiengang Physik-Diplom
Sonja Bernhardt, Studiengang Physik-Diplom

1 Theorie

1.1 Wellenoptik und Teilchen-Welle-Dualismus

Christiaan Huygens stellte bereits im 17. Jahrhundert fest, dass sich bestimmte optische Phänomene erklären lassen, wenn man dem Licht Wellencharakter zuspricht.¹

Seit Newton vermutet man auch die Existenz von Lichtteilchen, später Photonen genannt. Heute vereint man beide Vorstellungen und spricht vom Teilchen-Welle-Dualismus, der sich durch die Wellenfunktion der Quantenmechanik auflösen lässt.

1.1.1 Kohärenz

Lichtwellen heißen kohärent², wenn die Zeitabhängigkeit ihrer Amplituden (bis auf eine konstante Phasenverschiebung) die gleiche ist. Eine unendlich ausgedehnte *monochromatische* Kugelwelle (aus einer Punktlichtquelle) ist perfekt kohärent, kommt jedoch in der Natur nicht vor und kann auch nicht künstlich erzeugt werden.

Im Allgemeinen können nur Wellenzüge aus der selben Quelle kohärent sein, da es praktisch ausgeschlossen ist, dass zwei unabhängige Lichtquellen zufällig dieselbe Schwingung ausführen.³ Licht aus der selben Quelle kann jedoch auf verschiedenen Wegen den selben Ortspunkt erreichen. Die Differenz der Weglängen bezeichnet man als *Gangunterschied* Δl .

Bei der Diskussion realer Lichtquellen unterscheidet man *zeitliche*⁴ und *räumliche Kohärenz*. Von ersterem spricht man bei annähernd monochromatischem Licht (d.h. Licht einer Farbe), dessen Phase an einem festen Ortspunkt eine *Kohärenzzeit* τ genannte Zeit lang harmonisch oszilliert. Nach dieser Zeit kann die Phase der Lichtwelle von der gedachten Schwingung abweichen. Die Kohärenzzeit von thermisch erzeugtem Licht liegt in der Größenordnung 10^{-15} s. Der Weg, den das Licht (Ausbreitungsgeschwindigkeit $c \approx c_0$) in der Zeit τ zurücklegt, heißt *Kohärenzlänge* $L = c \cdot \tau$.

Die Kohärenzlänge darf nicht mit der räumlichen Kohärenz⁵ verwechselt werden. Letzteres beschreibt die Kohärenz zweier Ortspunkte in Abhängigkeit deren Abstandes (senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes). Sie hängt von der Beschaffenheit der Lichtquelle und deren Entfernung ab. Eine Punktlichtquelle, also auch eine sehr weit entfernte Quelle, erzeugt Licht mit guter räumlicher Kohärenz.

In der Literatur bezeichnet Kohärenz oft nur die zeitliche Kohärenz.

¹Vorher kannte man die geometrische Optik, die das Licht als sich geradlinig ausbreitende Strahlen beschreibt. Wegen der extrem kurzen Wellenlängen fällt der Wellencharakter von Licht im Alltagsleben nicht auf.

²lat.: cohaerere = zusammenhängen

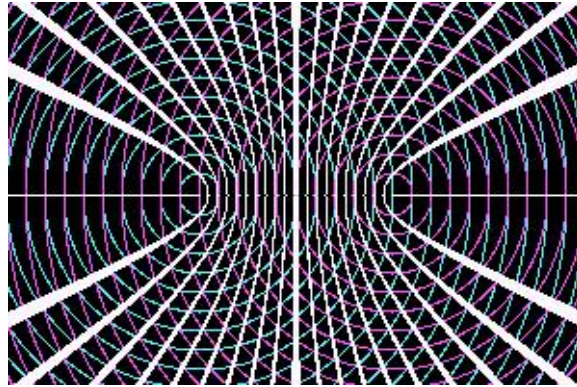
³Ein Atom kann jedoch von einem Photon so stimuliert werden, dass es ein Photon aussendet, welches zu diesem kohärent ist; siehe Abschnitt 1.2.1. Die Frage, warum Licht, das von verschiedenen Sternen ausgesandt wurde, als kohärent beschrieben werden kann, soll hier nicht näher betrachtet werden.

⁴äquivalent: longitudinale Kohärenz

⁵engl.: spatial coherence

1.1.2 Interferenz

Als Interferenz⁶ bezeichnet man ein Phänomen, das bei der Überlagerung zweier Wellen gleicher Wellenlänge auftritt: Die Überlagerung zweier Kreiswellen erzeugt ein Muster aus hyperbelförmigen Interferenzmaxima, dazwischen beobachtet man geringere Amplituden bis hin zur totalen Auslöschung:



Quelle: Karl Bednarik; Computergrafik mit GW-BASIC; GNU FDL

Optische Interferenz beobachtet man bei der Superposition kohärenter Wellenzüge.⁷ Die Grundlage auf diesem Gebiet legte Thomas Young in seinem berühmten Doppelspalt-Experiment, dem optischen Pendant zur oben abgebildeten Interferenz von Kreiswellen:

Vollkommen analog beobachtet man auf einem Schirm hinter einem Doppelspalt (zwei virtuelle kohärente Lichtquellen) Minima und Maxima, welche bereits in den Experimenten “Beugung am Spalt” und “Beugung am Gitter” untersucht wurden. (Der Schirm entspricht der unteren Kante der obigen Abbildung.) Über eine geometrische Betrachtung der Lichtwege lässt sich der Gangunterschied für einen Punkt auf dem Schirm berechnen. Ist der Gangunterschied ein vielfaches der Wellenlänge ($\Delta l = k\lambda$; $k \in \mathbf{N}$), überlagern sich je zwei Wellenberge; man erhält ein Maximum und spricht von konstruktiver Interferenz. Bei einem Gangunterschied von $\Delta l = (k + \frac{1}{2})\lambda$ liegt ein Minimum bzw. destruktive Interferenz vor.

Da die mathematische Beschreibung der Interferenz als Superposition harmonischer Schwingungen nicht zum Verständnis der Holographie beiträgt, sei hier und im Folgenden darauf verzichtet.

1.2 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Der *Laser*, erst 1960 erfunden, hat längst Einzug in die Alltagswelt gefunden. Dieses Dokument wurde nicht nur mit Hilfe eines Lasers gedruckt; es ist zuvor, digital kodiert mit Laserlicht in einer Glasfaser um die halbe Welt gereist und selbst die Musik, mit der der Autor sich von der Arbeit ablenkte, wurde mit einem infraroten Laser von einer Silberscheibe gelesen, welche jedoch legal erworben, also vermutlich nicht mit Laserlicht beschrieben wurde. Laser können jedoch nicht nur Musikdaten lesen oder auf Noten “pointen”, manche sind sogar selbst musikalisch.⁸

Der Laser erzeugt räumlich und zeitlich kohärentes, kollimiertes⁹ Licht, welches meist annähernd monochromatisch und linear polarisiert ist.

Der Vorgänger des Lasers heißt *Maser* und arbeitet mit Mikrowellen.

1.2.1 Absorption und Emission von Photonen im Lichtfeld

Durch Energiezufuhr kann ein Elektron eines Atoms im Grundzustand in einen sogenannten angeregten, d.h. energiereicheren, Zustand übergehen. Diese Energie kann von einem Photon, das *absorbiert* wird und

⁶lat.: inter = zwischen; ferire = schlagen, treffen

⁷Die quantentheoretische Beschreibung der Interferenz eines Photons mit sich selbst ist für uns nicht relevant.

⁸Universität Stuttgart – Institut für Technische Physik: “Der Singende Laser”, präsentiert bei der “Lagen Nacht der Wissenschaften” am 25.09.2004

⁹gebündeltes

dessen Energie ($E = hf$) der Differenz der beiden Energieniveaus¹⁰ entspricht, aufgebracht werden.

Gibt das angeregte Atom diese Energie wieder ab, *emittiert* es ein Photon derselben Frequenz. Bei freien Atomen erfolgt diese Emission spontan, Polarisation und Phase sind zufällig.

Befindet sich ein angeregtes Atom jedoch in einem Lichtfeld geeigneter Frequenz, schwingt es exakt synchron zu diesem. Ein emittiertes Photon stimmt in diesem, *stimulierte Emission* genannten, Fall in Frequenz, Phase, Polarisation und Ausbreitungsrichtung mit dem anregenden Lichtstrahl überein; dieser wird verstärkt.

1.2.2 Besetzungszustand und Inversion

Ob ein Lichtfeld durch stimulierte Emission verstärkt oder durch Absorption abgeschwächt wird, hängt vom Verhältnis der Anzahl der Atome im angeregten Zustand N_2 zur Anzahl derer im Grundzustand N_1 ab. (*Besetzungszustand*)

Im thermischen Gleichgewicht – beschrieben durch die Boltzmann-Verteilung – überwiegt stets das energetisch niedrigere Energieniveau:

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} \quad (1)$$

k := Boltzmann-Konstante, T := Temperatur (Kelvin), E_i := Energie der Zustände

Bei einem System, bei dem das höherliegende Energieniveau überwiegt, spricht man von *Besetzungsinversion*. Da Teilchen danach streben in der Summe ihre Energie zu minimieren¹¹, ist dieser Zustand instabil und muss künstlich durch Energiezufuhr¹² herbeigeführt und aufrecht erhalten werden.

1.2.3 Drei-Niveau-Laser

Zur Beschreibung der Laser-Prozesse muss ein System mit mehr als zwei Energiezuständen betrachtet werden: $E_3 > E_2 > E_1$

Man wählt ein Medium, in dem der spontane Übergang $E_3 \rightarrow E_2$ gegenüber $E_2 \rightarrow E_1$ bevorzugt ist. Der hierdurch bevorzugte Zustand E_2 heißt metastabil, die durchschnittliche Lebensdauer der angeregten Atome ist hier verhältnismäßig lang (10^{-3} s).

Durch Energiezufuhr, z.B. Einstrahlung von kurzwelligem Licht, werden ständig Übergänge $E_1 \rightarrow E_3$ herbeigeführt. Der Übergang $E_3 \rightarrow E_2$ verläuft strahlungslos, $E_2 \rightarrow E_1$ durch stimulierte Emission.

Reale Laser werden oft besser durch ein Vier-Niveau-System beschrieben. Die technische Realisierung sei hier ausgeklammert.

1.3 Fotografie und optische Wahrnehmung

Das menschliche Auge nimmt in jedem Moment¹³ eine unschätzbare Menge an Information auf. Der optische Eindruck scheint Gegenstände im Sichtfeld umfassend zu beschreiben. Wir wissen, dass das Auge auf Licht auf am Objekt gestreutes Licht reagiert. Der Wunsch diese – zunächst nur für den Moment verfügbare – Information permanent festzuhalten ist daher verständlich.

In der klassischen Fotografie¹⁴ wird das am Objekt gestreute Licht in eine Ebene abgebildet, in der sich eine lichtempfindliche Schicht befindet. Diese wird entsprechend der Intensität des einfallenden Lichtes

¹⁰ausführliche Diskussion im Rahmen der Röntgenversuche

¹¹gilt auch in der quantenmechanischen Beschreibung

¹²“optisches Pumpen”

¹³etwa 25 mal pro Sekunde

¹⁴Bei dem alltäglichen Begriff des “Fotos” verwenden wir längst selbstverständlich die eingedeutschte Schreibweise; bei weniger verbreiteten Begriffen wie “Holographie” verwendet gängige Literatur jedoch ausnahmslos die Schreibweise mit “ph”.

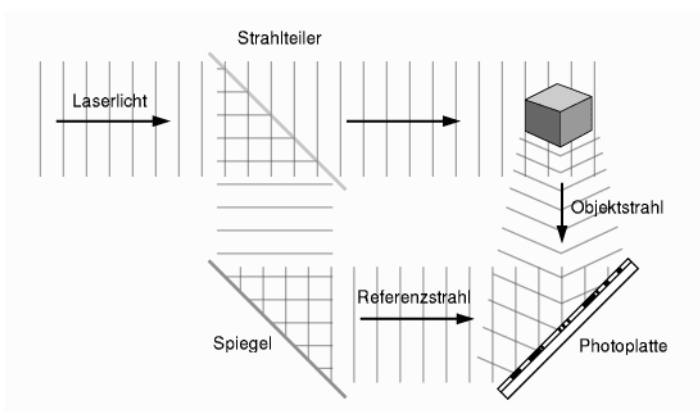
geschwärzt.¹⁵ Man erhält eine zwei-dimensionale Abbildung des Objektes. Der drei-dimensionale Eindruck beim Betrachten entsteht im Gehirn.¹⁶ Die tatsächliche Rekonstruktion des drei-dimensionalen Objektes gelingt hier nur durch die Kombination der Information mehrerer aus verschiedenen Winkeln aufgenommener Bilder.¹⁷

1.4 Holographie

1948, also vor Erfindung des Laser, hatte Dennis Gábor (Nobelpreis 1971) erstmals die Idee neben der Intensität (Amplitude) des Lichtes auch dessen Phase aufzuzeichnen.

Bei der Aufnahme eines *Hologramms*¹⁸ zeichnet man nicht die (Intensität der) vom Objekt gestreuten Lichtwellen auf, sondern das Muster, das bei deren Interferenz mit nichtgestreuten Licht auftritt. Dieses Interferenzmuster enthält insbesondere auch Informationen über die Phase des gestreuten Lichts und damit über die Länge des Lichtwegs, also über die räumliche Situation.

Man benötigt dazu eine monochromatische, ausreichend kohärente Lichtquelle¹⁹, deren Licht durch eine geeignete Optik die Photoplatte²⁰ sowohl direkt (*Referenzstrahl*) als auch nach Streuung am abzubildeten Objekt (*Objektstrahl*) trifft. Da die Interferenzringe einen Abstand von etwa einer halben Wellenlänge²¹ haben werden, muss der Aufbau unbedingt vor Erschütterungen geschützt werden. Es versteht sich von selbst, dass Störlicht unbedingt zu vermeiden ist.



nach einer Wikipedia-Grafik; GNU FDL

Im Gegensatz zur klassischen Fotografie, bei der jedem Punkt (der zwei-dimensionalen Projektion) des Objektes einem Punkt auf der Photoplatte entspricht, wird jeder Punkt eines Hologramms von Licht, das an jedem Objektpunkt gestreut wurde, beeinflusst. Jeder Teil eines Hologramms enthält also Informationen über das ganze Objekt.

Üblicherweise benötigt man zur Rekonstruktion des Bildes aus dem Hologramm wieder einen Lichtstrahl, der dem zur Aufzeichnung verwendeten gleich ist, insbesondere also eine monochromatische Lichtquelle.

Durch Beugung am Interferenz-Muster im entwickelten Film entstehen wieder Lichtwellen, die zur den ursprünglichen Objektwellen identisch sind. Die rekonstruierten Objektwellen enthalten alle Informationen der ursprünglichen Objektwellen, auch deren Phasenbeziehung. Der Betrachter sieht ein drei-dimensionales Abbild des Objektes. Er kann seinen Blickwinkel verändern und erhält stets die Information, die er durch direkte Betrachtung des Objektes (beleuchtet durch die Lichtquelle, die zur Aufzeichnung verwendet wurde) erhalten hätte.

¹⁵Der Farbfotografie sei hier nicht betrachtet

¹⁶Durch geeignete Stilmittel wie z.B. begrenzte Tiefenschärfe kann der Fotograf den räumlich Eindruck verstärken ohne jedoch tatsächlich die räumliche Struktur festzuhalten.

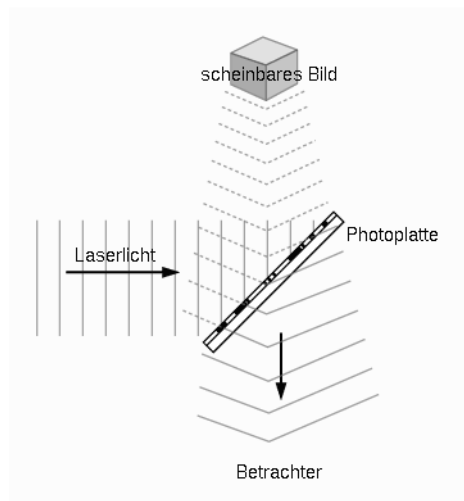
¹⁷Der Mensch macht mit seinen zwei Augen auch stets zwei Bilder und kombiniert die Information im Gehirn. Vgl.: Stereographie

¹⁸griech.: holos = ganz, vollständig; gramma = Botschaft, Nachricht, Zeichen

¹⁹Neben dem üblicherweise verwendeten Laser erfüllen nur wenige Lichtquellen diese Eigenschaften. Frühe Holographien verwendeten Quecksilber-Bogen-Lampen.

²⁰hochauflösender fotografischer Film

²¹typisch: $\lambda/2 \approx 300 \text{ nm}$



nach einer Wikipedia-Grafik; GNU FDL

1.4.1 Weißlichtholographie

Wir untersuchen einen Spezialfall der Holographie, mit dem Hologramme erzeugt werden, die sich unter dem inkohärenten Licht einer Punktlichtquelle betrachten lassen.

Die Herstellung eines solchen Hologramms benötigt jedoch nach wie vor einen Laser: Er wird durch eine geeignete Optik aufgeweitet und beleuchtet die Photoplatte. Hinter dieser Platte befindet sich das abzubildende Objekt. Das Objekt wird also durch den Film hindurch beleuchtet und belichtet diesen aus dem Referenzstrahl entgegengesetzter Richtung. (Um beim Betrachten des Hologramms nicht direkt in die Lichtquelle schauen zu müssen, platziert man Film und Objekt nicht direkt in der optischen Achse.)

Durch Überlagerung von Referenz- und Objektstrahl (letzterer ist der am Objekt "reflektierte Referenzstrahl") entsteht im ausreichend dicken Film die Andeutung einer stehenden Welle, d.h. Interferenzschichten, die annähernd parallel zur Oberfläche der Photoplatte verlaufen.

Bei der Rekonstruktion des Bildes mit weißem Licht, wirken diese Schichten als Bragg-Gitter, an welchen konstruktive Interferenz stets nur für die passende Wellenlänge möglich ist. Wieder entsteht durch Beugung der ursprüngliche Objektstrahl.

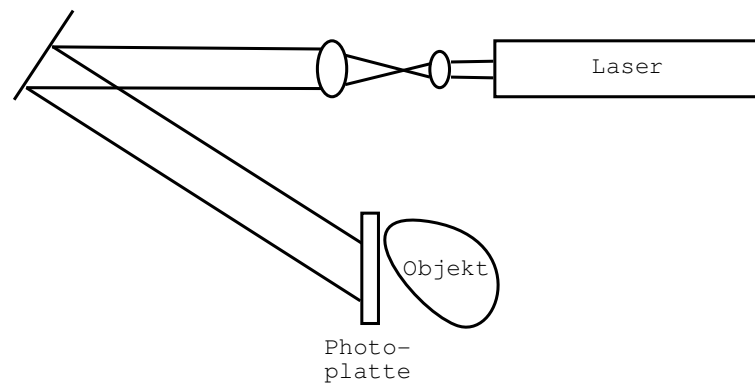
Die Lichtquelle befindet sich bei der Rekonstruktion eines solchen sogenannten *Weißlicht-Transmissions-Hologramms* an der Stelle des Lasers; man betrachtet es aus dem Winkel, in dem sich das Objekt befand (jeweils relativ zum Film).

Eine populäre Variante ist das *Weißlicht-Reflektions-Hologramm*, wie man es auf Kreditkarten und Banknoten findet. Salvador Dalí beansprucht für sich als erster Hologramme als Kunstwerk geschaffen zu haben.

2 Experiment

2.0.2 Durchführung

Es wurden fünf Weißlicht-Transmissions-Hologramme gemäß der Anleitung auf der Tafel im Holographie-Labor hergestellt. Der Aufbau entspricht Abschnitt 1.4.1:



Als Film verwendeten wir den Agfa Holotest, die Belichtungszeit variierten wir zwischen 9 und 25 Sekunden. Unser Objekt war eine Pyramide aus Kreidestückchen und eine weiße Schweinchen-Figur.

2.0.3 Ergebnisse

Auf allen Hologrammen waren bei Betrachtung im Licht einer Kohlebogen-Lampe (eingeschränkt auch mit einer Halogen-Schreibtisch-Lampe) die Kreidestücke gut zu erkennen. Das Schweinchen ließ sich erahnen. Alle Hologramme haben einen "weißen Fleck", auf dem nichts zu erkennen ist; eventuell überbelichtet.

3 Fragen

siehe Theorieteil

A Literatur

- Wikipedia, die freie Enzyklopädie
<http://de.wikipedia.org>
- Dieter Meschede: Gerthsen – Physik
21. Auflage, 2002, Springer
- Wolfgang Demtröder: Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik
2. Auflage, 2002, Springer
- P. Hariharan: Basics of Holography
2002, Cambridge University Press

B Nachtrag

B.1 Entwicklung eines fotografischen Films

Nach dem Belichten wird ein fotografisches Material, Film oder beschichtete Platte, einem Prozess unterworfen, den man als Entwicklung bezeichnet. Obwohl es eine Reihe unterschiedlicher Filmtypen und damit verbundener Entwicklungsvorgänge gibt, folgt die Entwicklung im wesentlichen dem standardisierten Prozess zur Entwicklung eines Schwarz-Weiß-Filmes:

- Die *Entwicklungsflüssigkeit* macht das auf dem Film latent vorhandene Bild sichtbar. Entwickler sind Reduktionsmittel, die auf belichtete und unbelichtete Stellen unterschiedlich reagieren.
- Das *Stoppbad* unterbricht den Entwicklungsprozess. Es handelt sich um eine saure Lösung, die den basischen Entwickler neutralisiert.
- Im *Fixierbad* wird das Bild dauerhaft und lichtbeständig gemacht.
- Das aggressive Fixiermittel muss hinterher mit Wasser abgewaschen werden.

B.2 Frage 1

Das *Auflösungsvermögen des Mikroskops* ist durch Beugungsphänomene begrenzt. Bei der Holographie nutzt man zur Abbildung eben diese Erscheinungen aus.