

Bericht zum Versuch **Holographie**

Michael Goerz, Anton Haase

4. Dezember 2006

FREIE UNIVERSITÄT BERLIN
Fortgeschrittenenpraktikum Teil A
Tutor: H. Fidder

Inhalt

1 Einführung	2
1.1 Michelson-Morley-Interferometer	2
1.2 Optische Abbildungen: Fouriertransformation	2
1.3 Transmissionsholographie	3
1.3.1 Aufzeichnung	4
1.3.2 Betrachtung	4
1.4 Amplituden- und Phasenhologramme	5
1.5 Reflexionsholographie	5
1.5.1 Aufzeichnung	5
1.5.2 Betrachtung	6
1.6 Herstellung optischer Bauteile	7
2 Fragestellung	8
3 Durchführung und Auswertung	8
3.1 Michelson-Interferometer und Kohärenzlänge des Lasers	8
3.2 Stabilität des Aufbaus	8
3.3 Erstellung der Hologramme	9
3.4 Entwicklung des Films	9
4 Zusammenfassung	10

1 Einführung

Bei der Holographie handelt es sich um ein photographisches Verfahren, bei dem räumliche Informationen erhalten bleiben. Während bei einem normalen Photo nur die auf die Photoplatte auftreffende Lichtintensität festgehalten wird, speichert man beim Hologramm die gesamte Welleninformation einschließlich der Phase. Gemäß dem Huygenschen Prinzip ist durch das vollständige Speichern der Welleninformation in nur einer Ebene die gesamte räumliche Information enthalten, und das abgebildete Objekt kann dreidimensional rekonstruiert werden.

Die Theorie des Hologramms wurde 1948 von Gabor entwickelt, aufgrund von Schwierigkeiten bei der technischen Umsetzung kam das Verfahren dann aber erst in den 60er und 70er Jahren „in Mode“.

Um die Phaseninformation festzuhalten, wird ein zweiter Referenzstrahl benutzt, der mit dem Objektstrahl auf der Photoplatte interferiert. Die Phase des Objektstrahls wird somit relativ zur konstanten Phase des Referenzstrahls festgehalten. Damit dies gelingt, benötigt man kohärentes Licht mit fester Phasenbeziehung, also z.B. Laserlicht. Das erhaltene Bild hat im Vergleich zu einem Photo zunächst einmal keine Ähnlichkeit mehr mit dem Originalobjekt, es muss erst wieder speziell beleuchtet werden, um das Originalbild dreidimensional zurückzuerhalten. Im Allgemeinen sind Hologramme nicht farberhaltend.

Wie man sich leicht denken kann, ist der Aufbau zur Erstellung eines Hologramms extrem anfällig gegenüber mechanischen Störungen. Referenz- und Objektstrahl interferieren innerhalb einer Wellenlänge, sodass sich die Bauteile innerhalb der Belichtungszeit nur um Bruchteile derselben bewegen dürfen. Wir benötigen daher ein Instrument, um unseren Aufbau auf die notwendige Stabilität prüfen zu können.

1.1 Michelson-Morley-Interferometer

Das Michelson-Morley-Interferometer ist eine solche Apparatur zur Untersuchung kleinster Weglängenänderungen im Bereich der Wellenlänge der verwendeten kohärenten Lichtquelle (meist ein He-Ne-Laser). Der schematische Aufbau ist in Abb. 1 dargestellt. Es besteht aus einer kohärenten Lichtquelle (Laser), dessen Strahl im Zentrum der Apparatur durch einen Strahlteiler (halb-durchlässiger Spiegel) geteilt und auf verschiedene Spiegel gelenkt wird. Die Reflektion beider Strahlen wird mit dem Strahlteiler wieder überlagert und schließlich auf einem Detektor (Schirm) zur Interferenz gebracht. Ist der Weglängenunterschied, den die beiden Strahlen relativ zueinander durchlaufen haben innerhalb der Kohärenzlänge der Lichtquelle, so wird auf dem Schirm ein Interferenzmuster zu beobachten sein. Wird die Weglängendifferenz minimal verändert (Subwellenlängenbereich), so ändert sich das Muster am Detektor. Die Änderung der Länge des optischen Weges im Nanometerbereich ist somit also messbar. Dies kann beispielsweise zur Prüfung der mechanischen Stabilität eines der Spiegel (welcher auf dem interessierenden Objekt montiert wird) benutzt werden.

1.2 Optische Abbildungen: Fouriertransformation

Das Grundkonzept der Bilderzeugung mittels Beugung und Interferenz beruht auf der Tatsache, dass das Beugungsbild gerade die Fouriertransformierte des

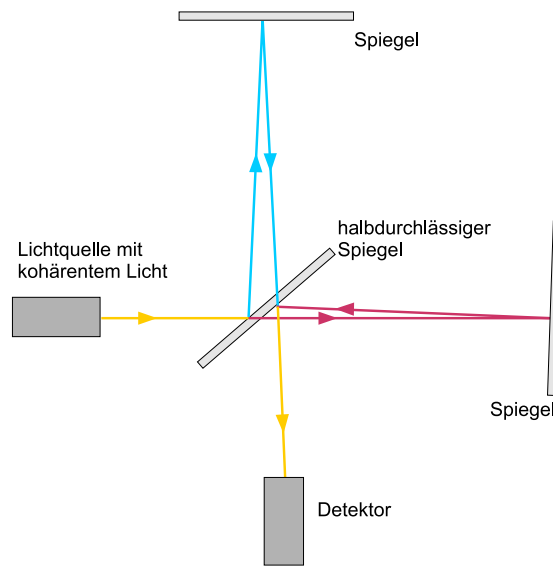


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Michelson-Morley-Interferometers

Originals ist. Daraus ist sofort ersichtlich, dass das Beugungsbild der Abbildung die Rücktransformierte, also wieder das Original ist. Dieses Konzept hat für sich schon vielfältige Anwendungen, etwa in Form der Fresnelschen Zonenplatte, oder als Methode zur Herstellung optischer Bauteile (siehe Abschnitt 1.6).

Desweiteren wird dieser Zusammenhang aber auch ausgenutzt, um aus dem Hologramm wieder ein sichtbares Bild zu konstruieren: Das Hologramm wird wieder vom Referenzstrahl (oder auch von weißem Licht) beleuchtet, sodass für den Beobachter wieder das Original sichtbar wird.

1.3 Transmissionsholographie

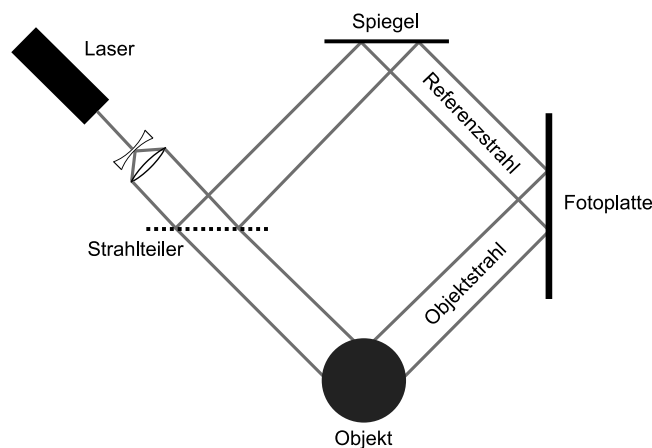


Abb. 2: Möglicher Aufbau zur Aufnahme eines Transmissionshologramms

Man unterscheidet zwischen verschiedenen Varianten der Holographie, die sich in ihrem Aufbau unterscheiden. Eine Möglichkeit ist die der Transmissionsholographie, bei der Objekt- und Referenzstrahl von derselben Seite auf den Photoschirm treffen. Betrachtet wird das Bild dann, indem man die Aufnahme wieder mit dem Referenzstrahl durchleuchtet. Der Aufbau ist in Abb. 2 dargestellt.

1.3.1 Aufzeichnung

Die auf dem Schirm auftreffende Welle setzt sich zusammen aus der Objektwelle und der Referenzwelle

$$E(x, y, t) = S \cdot e^{i\vec{k}_1 \vec{r}} \cdot e^{-i\omega t} + R \cdot e^{i\vec{k}_2 \vec{r}} \cdot e^{-i\omega t} \quad (1)$$

Die tatsächlich abgebildete Intensität ist das Betragsquadrat dieser Welle:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= E \cdot E^* \\ &= \left(S \cdot e^{i\vec{k}_1 \vec{r}} + R \cdot e^{i\vec{k}_2 \vec{r}} \right) \cdot \left(S \cdot e^{-i\vec{k}_1 \vec{r}} + R \cdot e^{-i\vec{k}_2 \vec{r}} \right) \\ &= S^2 + R^2 + SR \cdot e^{i\phi} + RS \cdot e^{-i\phi}; \quad \phi = (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \vec{r} \end{aligned} \quad (2)$$

Die räumliche Phase bleibt im dritten Term erhalten, im vierten steht sie noch einmal konjugiert komplex.

Oft schreibt man auch kurz, indem man die Phase in die (dann komplexe) Amplitude hineinzieht:

$$I(x, y) = SS^* + RR^* + R^*S + RS^* \quad (3)$$

Die Schwärzung der Photoplatte ergibt sich aus dem Zeitintegral über die Intensität, $\int_0^{t_B} I dt$, was noch einmal verdeutlicht, warum der Aufbau so empfindlich gegenüber Störungen ist.

1.3.2 Betrachtung

Wird der Laser nun zur Betrachtung wieder auf die Photoplatte gerichtet, transmittiert ein Teil des Lichts gemäß einem Transmissionskoeffizienten $\tau = E_a/E_e$, $E_e = R$, der lokal zu der Intensität bei der Hologrammerzeugung an dieser Stelle proportional ist (der lineare Zusammenhang wird in Abschnitt 1.4 ausgeführt)

$$\tau \propto I \quad (4)$$

Damit ist dann die (komplexe) Amplitude der transmittierten Welle

$$E_q \propto R \cdot |S|^2 + R \cdot |R|^2 + |R|^2 \cdot S + R^2 \cdot S^* \quad (5)$$

Die vier Terme lassen sich folgendermaßen interpretieren: die ersten beiden Terme sind die nullte Ordnung der Referenzwelle, jeweils verbreitert mit $|S|^2$ bzw. $|R|^2$, der dritte Term ist das eigentlich interessante virtuelle Bild, welches sowohl Objektamplitude als auch Objektphase enthält, der 4. Term ist ein konjugiertes Bild, welches für unsere Zwecke ein Störeffekt darstellt (vgl. Gl. 2).

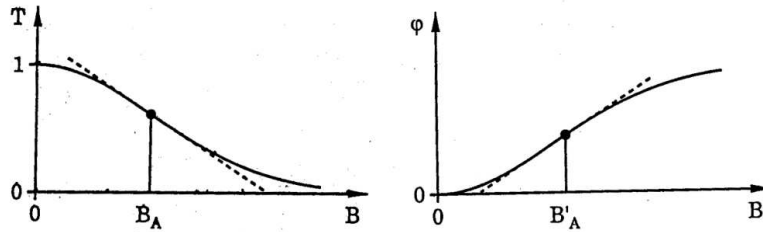


Abb. 3: Verlauf von T und ϕ beim Amplituden- bzw. Phasenhologramm (aus [2])

1.4 Amplituden- und Phasenhologramme

Abhängig von der Beschaffenheit der Photoplatte kann man ein Amplituden- oder Phasenhologramm erstellen, je nachdem, wie der genaue Zusammenhang in Gl. 4 ist.

Allgemein gilt

$$\tau(x, y) = T(x, y)e^{i\phi(x, y)} \quad (6)$$

Nimmt man $\phi = \text{const}$ an, kommt man zum Amplitudenhologramm, für $T = \text{const}$ zum Phasenhologramm. Die Verläufe von ϕ und T sind in Abb. 3 in Abhängigkeit von der Belichtung $B = It_B$ skizziert. Beide Funktionen werden um einen Arbeitspunkt B_A linear genähert. Für das Amplitudenhologramm gilt also der lineare Zusammenhang

$$T = a - bIt_B \quad (7)$$

Beim Phasenhologramm geht man ähnlich vor, muss allerdings noch die Exponentialfunktion entwickeln, und kommt auf

$$\tau = Te^{i\phi I} \approx T + Ti\phi(I) \quad (8)$$

In beiden Fällen kommt man auf Gl. 4.

Im Vergleich liefert das Phasenhologramm hellere Bilder, dafür hat es aufgrund seiner stärkeren Nicht-Linearität aber mehr Störeffekte.

1.5 Reflexionsholographie

Die Transmissionsholographie hat einen für die praktische Anwendung entscheidenden Nachteil. Zur Rekonstruktion des Bildes wird wiederum kohärentes Licht benötigt. Bei der Reflexionsholographie wird das Hologramm in leicht abgewandelter Weise aufgenommen, was die Erzeugung sog. Weißlichthologramme ermöglicht.

1.5.1 Aufzeichnung

Ein Beispiel für einen Aufbau zur Aufnahme eines Reflexionshologramms ist in Abb. 4 gegeben. Objektstrahl und Referenzstrahl treffen hier von unterschiedlichen Seiten auf das Filmmaterial. Dieses ist ebenfalls anders beschaffen als

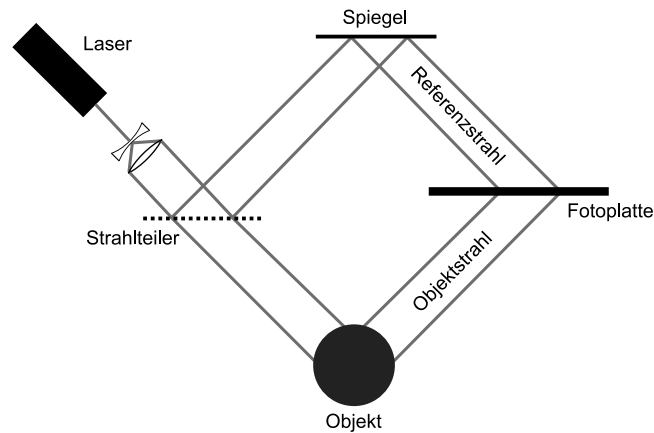


Abb. 4: Schematischer Aufbau zur Aufnahme eines Reflexionshologramms

zuvor. Es ist wesentlich dicker und besteht aus einer Gelatineschicht, welche in all ihren Ebenen ein Interferenzbild aufnehmen kann. Der Aufbau ist so gestaltet, dass Referenz- und Objektstrahl innerhalb des Fotomaterials eine stehende Welle ausbilden und somit in mehreren Ebenen ein Interferenzmuster erzeugen, wie es in Abb. 5 dargestellt ist.

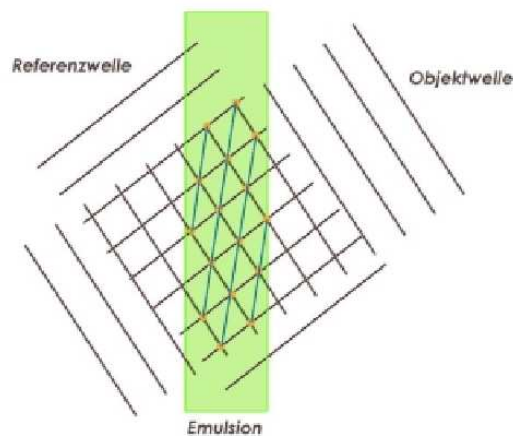


Abb. 5: Ausbildung einer stehenden Welle im Fotomaterial

Der Aufbau zur Aufnahme eines Reflexionshologramms lässt sich auch noch um einiges vereinfachen, wie Abb. 6 zeigt. Diese Methode wurde 1963 von dem Wissenschaftler Yuri N. Denisyuk entwickelt und trägt daher auch den Namen „Denisyuk-Methode“.

1.5.2 Betrachtung

Die Betrachtung des Hologramms erfolgt durch Reflexion eines Referenzstrahls. Dieser befindet sich folglich auf der gleichen Seite wie das Auge und kann auch aus „normalem“ weißen Licht bestehen, da die Speicherung der Phasen und Am-

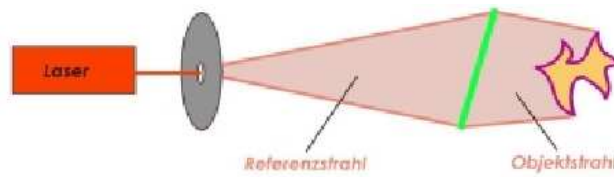


Abb. 6: Vereinfachter Aufbau zur Aufnahme eines Reflexionshologramms (aus [1])

plitudeninformation in den Netzebenen erfolgt ist. Es findet eine Beugung nach der Braggschen Beugungsbedingung statt, die der Beobachter des Hologramms durch unterschiedliche Farben bei verschiedenen Winkeln wahrnimmt.

1.6 Herstellung optischer Bauteile

Neben der Aufnahme von holographischen Bildern, lässt sich mit den beschriebenen Verfahren auch eine Reihe optischer Elemente erzeugen. Der schematische Aufbau zur Erzeugung eines optischen Gitters ist in Abb. 7 gegeben. Beide Strahlen müssen analog zu den zuvor beschriebenen Verfahren aus *einer*

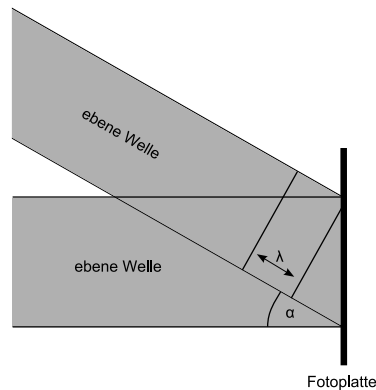


Abb. 7: Erzeugung eines optischen Gitters

kohärenten Lichtquelle stammen. Sie werden durch Spiegel so umgelenkt, dass sie in einem bestimmten Winkel α auf die Fotoplatte treffen. Das Interferenzmuster auf der Platte entspricht dann einem Strichgitter mit der Gitterkonstanten

$$d = \frac{\lambda}{\sin(\alpha)}. \quad (9)$$

Es ist somit also möglich, durch Variation des Winkels α Gitter mit unterschiedlicher Gitterkonstanten d zu erzeugen (wobei die untere Grenze für d gerade λ ist).

Ein anderes Beispiel ist die Erzeugung einer Fresnelschen Zonenplatte, die durch holographische Abbildung eines Lichtpunktes erzeugt werden kann.

2 Fragestellung

Ziel des Versuchs ist der Aufbau einer Apparatur zur Erzeugung von Weißlichthologrammen. Es soll die Stabilität des Aufbaus überprüft werden und mehrere Hologramme erstellt werden.

3 Durchführung und Auswertung

Zu Beginn des Versuches haben wir einige von Vorgängern hergestellte Hologramme betrachtet. Dabei war das drei-dimensionale Bild, wie erwartet, hinter dem Hologramm deutlich sichtbar; durch Drehen des Hologramms konnte man „um die Figuren herumgucken“.

3.1 Michelson-Interferometer und Kohärenzlänge des Lasers

Unter Verwendung der im Labor befindlichen optischen Geräte haben wir dann auf dem schwingungsgedämpften und mit einem Holzkasten überdeckten Tisch ein Michelson-Interferometer wie in Abb.1 aufgebaut, um die Stabilität des Aufbaus auszutesten. Der Laserstrahl wurde dabei durch zwei Linsen (konkav und konvex) und einer Blende aufgeweitet. Der Abstand der Spiegel zum Strahlteiler war 22 bzw. 25cm. An die Stelle des Schirms haben wir nocheinmal einen Spiegel gesetzt, der das Interferenzmuster zur Seite reflektierte um eine möglichst gute Vergrößerung zu erreichen.

Durch Verschieben des Spiegel konnten wir die Kohärenzwellenlänge des Lasers bestimmen, bei deren Überschreitung keine Interferenz mehr sichtbar war. Es stellte sich heraus, dass das Interferenzmuster zwischen einer Wegdifferenz von 10-15cm an Sichtbarkeit verlor. Für die Kohärenzlänge muss dieser Wert verdoppelt werden, da der Strahl hin- und wieder zurückläuft. So konnten wir eine Kohärenzlänge des Lasers von in etwa

$$s_c = (24 \pm 2)\text{cm}$$

ermitteln.

3.2 Stabilität des Aufbaus

Sodann haben wir das Interferenzmuster mit einem elektronischen Sensor erfasst und an einen Schreiber weitergeleitet, um festzustellen, in welchem Maße sich Störungen auf den Aufbau auswirken würden. In einer Kurzzeitmessung haben wir Störungen wie lautes Sprechen, Schlagen der Tür, Aufstampfen und Berührungen des Tisches beobachtet, dann in einer Messung über 20 Minuten den Aufbau unter Vermeidung jeglicher Störungen belassen.

In den Ergebnissen der Kurzzeitmessung zeigt sich deutlich, dass Aufstampfen und die Benutzung der Tür einen wesentlichen Störeinfluss darstellen. Noch sehr viel empfindlicher reagiert der Aufbau auf Berühren des Tisches oder des Kastens, was zu wilden Ausschlägen auf den Schreiber führt, die erst nach mehr längerer Zeit wieder abklingen. Demgegenüber hat Reden in mäßiger Lautstärke nur einen geringeren Einfluss auf die Stabilität.

Die Langzeitmessung zeigt zudem, dass sich das System nur recht langsam ausschwingt. Die meisten Störungen sind nach ein bis zwei Minuten abgeklungen, die überlagerten langsamen Schwingungen (das charakteristische langsame Durchlaufen der Interferenzringe am Interferometer aufgrund von thermischer Ausdehnung) schwächt sich erst nach mehr als 10 Minuten ab, sichtbar ist dies durch eine leichte Verbreiterung der Sinus-Oberschwingung auf dem Schreiber. Mit einer Frequenz von weniger als 0.1 Hz ist dies für unsere Aufnahme nicht von großem Belang.

3.3 Erstellung der Hologramme

Im Anschluss an diese Vorarbeit haben wir den eigentlichen Aufbau für die Herstellung unserer Hologramme vorgenommen. Da wir Weißlicht-Reflexionshologramme aufgenommen haben, war der Aufbau recht einfach wie in Abb. 6 zu sehen. Das zu holographierende Objekt (zwei Schachfiguren und ein Spielzeugweihnachtsmann) wurde auf einem (um ca. 45°) gekippten Sockel angeklebt, an dem senkrecht dazu auch eine Halterung für eine Scheibe mit dem holographischen Film befestigt war. Der Laserstrahl ging zunächst durch die Scheibe und wurde dann vom Objekt gestreut.

Die Objekte müssen sich für die Aufnahme möglichst nah am Film befinden, damit erstens sich das gesamte Objekt innerhalb der Kohärenzlänge des Lasers (wegen der Reflektion darf der Abstand nur die Hälfte der Kohärenzlänge sein, also ca. 5 cm) und zweitens damit möglichst viel Streulicht auf dem Film eingefangen werden kann.

Die Verkippung der Sockels hat ebenfalls rein praktische Gründe: Zum einen wird dadurch Mehrfachreflektion eingeschränkt, die die Schärfe des Bildes beeinträchtigen könnte. Zweitens ist zu beachten, dass beim späteren Betrachten des Licht im selben Winkel einfallen muss wie der Referenzstrahl bei der Aufnahme. Das Bild erscheint im gespiegelten Winkel. Würde der Referenzstrahl senkrecht auf den Film fallen, würde der Beobachter also später genau die Lichtquelle mit seinem Schatten verdecken. Schließlich lässt sich, falls die Verkippung genau im Brewsterwinkel ist, die Reflektion minimieren, sodass mehr Intensität für die Bilder zur Verfügung steht.

Im Folgenden haben wir dann in vollständiger Dunkelheit den Film präpariert, ihn die Glasscheibe eingesetzt, und diese in die Halterung am Sockel eingeführt. Nach einer Zeit von mehreren Minuten zum Ausschwingen des Tisches haben wir dann je ein Bild mit 2s und ein Bild mit 4s Belichtungszeit gemacht, jeweils für beide Objekte.

3.4 Entwicklung des Films

Die Bilder wurden dann von uns in die Dunkelkammer zum Entwickeln gebracht und dort, wieder in absoluter Dunkelheit zunächst für zwei Minuten in einer Vitamin-C-Lösung (Ascorbinsäure und NaOH) entwickelt, kurz in Wasser fixiert, und schließlich in Chromschwefelsäure gebleicht. Danach wurden sie zum Trocknen mehrere Stunden in einen Ofen gehängt.

Durch das Bleichen wird das Hologramm zu einem Phasenhologramm. Unmittelbar nach dem Fixieren ist der Film an den belichteten Stellen geschwärzt, was ein Amplitudenhologramm darstellt: die Schwärzung modifiziert die Intensität des Lichts beim Beobachten. Die Bleichlösung verändert den Film nun

chemisch so, dass anstelle der Schwärzung der Brechungsindex und die Dicke des Filmmaterials verändert wird. Das Licht beim Beobachten wird jetzt nur noch in seiner Phase, nicht aber in seine Intensität verändert. Für die von uns mit nur relativ kurzer Belichtungszeit hergestellten Hologramme ist nur ein solches Phasenhologramm sinnvoll, das Bild wäre ansonsten zu dunkel um sichtbar zu sein.

Nach dem Trocknen waren die abgebildeten Objekte alle sehr deutlich dreidimensional sichtbar. Beim Trocknen ist die Gelatineschicht auf dem Film geschrumpft, was zu einer Verkleinerung des Gitters führt, sodass das Bild nun grün erscheint, und nicht mehr im Rot des Lasers.

Die Bilder mit längerer Belichtungszeit sind intensiver, allerdings auch unschärfer, wie man es erwartet.

4 Zusammenfassung

Es ist uns in dem Versuch sehr erfolgreich gelungen, Hologramme unserer Objekte herzustellen. Dabei hat sich allerdings auch gezeigt, dass der von uns verwendete Aufbau sehr empfindlich ist. Zur Aufnahme noch besserer Hologramme (längere Belichtungszeit) müsste noch mehr Schwingungsdämpfung realisiert werden, und man müsste dem Aufbau noch mehr Zeit zum Ausschwingen geben. Es könnte auch ein noch intensiverer Laser verwendet werden.

Literatur

- [1] FOUQUIER, Alex: *Facharbeit über Holographie*. 2000
- [2] LAUTERBORN, W. ; KURZ, T. ; WIESENFELDT, M.: *Kohärente Optik*. Springer-Verlag, 1993