

C-Kurs
Versuch II

Holografie

- Anleitung -

Dieser Versuch wurde im Rahmen eines
FI-Praktikums "saniert".

November 1993. Erik Baigar

Holografie (11)

Erik Baigar
Richard-Strauß-Str. 9
87616 Marktoberdorf

6. November 1995

Aufgabe 11: Holografie

Literatur: Siehe *Anhang B*.

Sinn des Versuchs: Sie sollen die Grundlagen der holografischen Technik kennenlernen und einige Hologramme selbst herstellen. Im Verlauf des Praktikums sollen Sie den Umgang mit verschiedenen optischen Komponenten erlernen, sowie durch das Entwickeln der Hologramme ein wenig Übung im Umgang mit Chemikalien und Filmmaterial erhalten.

Vorkenntnisse: Verständnis der Grundlagen von Interferenz; Beispiele für Interferenz; Beugung, zum Beispiel am Gitter; Laserstrahlenschutz; Eigenschaften des verwendeten Filmmaterials und Ablauf der Entwicklungsprozedur; „Funktionsweise“ von Hologrammen; Arten von Hologrammen und Unterschiede in der Aufnahmetechnik; Aufbauten zur Aufnahme und Rekonstruktion der Hologramme; Pseudoskopische und orthoskopische Bilder.

Versuchsdurchführung: Bei der Durchführung des Versuchs beachten Sie bitte folgendes:

1. *NIEMALS* in den Laserstrahl sehen!
2. Das Filmmaterial ist *SEHR TEUER*. Seien Sie also *SPARSAM*.
3. Optische Komponenten¹⁾ sind sehr empfindlich. Fassen Sie diese Teile immer nur *an der Halterung* an!

Der genaue Ablauf des Versuches ist im Kapitel 7 beschrieben.

Anmerkung: Dieses Praktikum soll Ihnen nicht nur Zeit kosten, sondern es soll Ihnen Einblicke in die faszinierende Welt der Holografie geben und dabei auch *Spaß* machen. Dabei ist die Anleitung als Hilfestellung und nicht als Vorschrift zu verstehen. Sie können und sollen auch eigene Ideen (z.B. bei den Aufbauten und dem Justiervorgang) einfließen lassen.

Die hergestellten Hologramme -insbesondere die Weißlichthologramme- sind nette Andenken, die Sie mit nach Hause nehmen können.

¹⁾Insbesondere der 4kDM teure Strahlteiler

Inhaltsverzeichnis

1	Laser-Strahlenschutz	4
1.1	Denkanstöße	4
2	Licht als Welle ♣	5
2.1	Die Wellengleichung	5
2.2	Lösungen der Wellengleichung	7
2.2.1	Ebene Wellen	7
2.2.2	Kugelwellen	11
2.3	Zusammenfassung	12
2.4	Denkanstöße	13
3	Die Interferenz ♣	15
3.1	Experimentelle Anordnungen	15
3.1.1	Das Michelson-Interferometer	15
3.1.2	Der Fresnel-Spiegel	15
3.1.3	Newton-Ringe	15
3.2	Interferenz bei ebenen Wellen	15
3.3	Interferenz bei Kugelwellen	19
3.4	Kohärenz	20
3.5	Denkanstöße	21
4	Holografie	22
4.1	Theorie	22
4.2	Hologrammarten	25
5	Die Modenblende	28
5.1	Wozu?	28
5.2	Einstellen der Modenblende	29
6	Das Filmmaterial	32
6.1	Eigenschaften	32
6.2	Allgemeine Hinweise zum Entwickeln	33
6.3	Entwickeln von Transmissionshologrammen	34
6.4	Entwickeln von Reflexionshologrammen	35
6.5	Bemerkung	35
7	Versuchsdurchführung	36
8	Michelsoninterferometer	37

♣ Die Kenntnis dieses Kapitels ist notwendig für das Verständnis, nicht jedoch für die Versuchsdurchführung.

9 Reflexionshologramme	39
9.1 Ein Grundaufbau	39
9.2 Erweiterung des Grundaufbaus	42
10 Transmissionshologramme	44
10.1 Ein einfacher Aufbau	44
10.2 Ein Aufbau für Fortgeschrittene	47
11 Bildebenen-Reflexionshologramm	49
12 „Spielchen“ mit den aufgenommenen Hologrammen	52
12.1 Reflexionshologramm	52
12.2 Transmissionshologramm	52
12.2.1 Pseudoskopie	52
12.2.2 Informationsspeicherung im Hologramm	52
12.2.3 Vergrößerungen	53
12.3 Bildebenenhologramm	53
12.3.1 Das Reflexionshologramm als Transmissionshologramm . .	53
12.3.2 Anmerkungen zum Bildebenenreflexionshologramm	53
A Zusammenfassung: Entwickeln	54
B Literaturliste	55

1 Laser-Strahlenschutz

Der im Praktikum verwendete Helium-Neon-Laser hat bei einer Wellenlänge von $632.8nm$ eine Ausgangsleistung von „nur“

$2mW$.

Das hört sich zwar wenig an, ist aber nicht zu unterschätzen: Blickt man direkt in die Sonne, so schmerzt dies und es können irreversible Schäden an der Retina entstehen. Blickt man jedoch direkt in den $2mW$ -Laserstrahl, so ist die Energiedichte (Einheit: $\frac{\text{Leistung}}{\text{Fläche}}$) auf der Netzhaut noch wesentlich höher, da der Laserstrahl auf eine wesentlich kleinere Fläche gebündelt wird. Es entstehen unter Umständen blinde Stellen auf der Retina, die man erst bemerkt, wenn ein erheblicher Prozentsatz der Retina geschädigt ist. ²⁾

Zur Vermeidung von Laserstrahlenschäden beachten Sie *unbedingt* folgende Dinge:

1. *NIEMALS* direkt in den Strahl schauen!
2. Bei der Rekonstruktion von Transmissionshologrammen ist ebenfalls Vorsicht geboten: Auch der aufgeweitete Strahl kann Schäden hervorrufen!
3. Bringen Sie nie unkontrolliert blanke Gegenstände in den Strahl. Diese könnten den Strahl unbeabsichtigt z.B. ins Auge Ihres Mitpraktikanten lenken. Also: Blanke Uhren, Ringe, Armreifen oder ähnliches bitte ablegen.
4. Der Strahl sollte die Arbeitsfläche nicht verlassen. Schirmen Sie den Strahl mit einer Pappe oder Sandpapierblende ab!

1.1 Denkanstöße

1. Schätzen Sie die Energiedichten ab, die ein Blick
 - (a) in die Sonne ³⁾
 - (b) in den $2mW$ -Laser ⁴⁾auf der Netzhaut verursacht. Vergleich?
2. Wie weit muß der $2mW$ -Laserstrahl aufgeweitet sein, damit Sie hineinschauen können, ohne einen Schaden am Auge befürchten zu müssen? ⁵⁾

²⁾Kleine Schäden werden nicht bemerkt, da das Auge stets in Bewegung ist und somit das Gehirn in der Lage ist, fehlende Stellen zu ergänzen.

³⁾Solarkonstante ca. $1000 \frac{W}{m^2}$, Pupillendurchmesser $1mm$, Brennweite der Augenlinse $25mm$ und Sonnengröße 32 Bogenminuten.

⁴⁾Nehmen Sie zur Abschätzung an, daß das Bild auf der Retina ein Beugungsscheibchen ist (Pupillendurchmesser $1mm$), in dem die $2mW$ homogen auftreffen. (Beugung am Loch z.B. in [3] oder [2])

⁵⁾Der Grenzwert für die Augenschädigung bei Dauerstrichlasern im sichtbaren Bereich läßt sich abschätzen (siehe [1]) durch $10^{-6+0.015 \cdot (\lambda-550)} \frac{W}{cm^2}$, wobei die Lichtwellenlänge λ in Nanometern einzusetzen ist. Nehmen Sie an, daß die Leistung des Lasers gleichmäßig in einen Kegel emittiert wird (Also kein gaußsches Strahlprofil vorliegt).

2 Licht als Welle ♣

Eine etwas theoretische Betrachtung von Licht als elektromagnetische Welle und Herleitung einiger wichtiger Gleichungen der Optik.
Es ist nicht so schlimm wie es aussieht!

2.1 Die Wellengleichung

Die Maxwell⁶⁾-Gleichungen, die ja bekanntlich alle Effekte von Elektrizität und Magnetismus beschreiben, lauten in voller Allgemeinheit:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 & \vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} + \dot{\vec{B}} &= 0 & \vec{\nabla} \times \vec{H} - \dot{\vec{D}} &= \vec{j} \end{aligned} \quad \text{7)} \quad (1)$$

Dabei sind

\vec{E}	, die elektrische Feldstärke	$[\vec{E}]_{SI} = V/m$
\vec{D}	, der dielektrische Verschiebungsvektor	$[\vec{D}]_{SI} = C/m^2$
\vec{B}	, die magnetische Flußdichte	$[\vec{B}]_{SI} = Vs/m^2$
\vec{H}	, die magnetische Feldstärke	$[\vec{H}]_{SI} = A/m$

Ferner beschreibt ρ vorgegebene Ladungsverteilungen ($[\rho]_{SI} = V/m^3$), während \vec{j} für Ströme zuständig ist ($[\vec{j}]_{SI} = A/m^2$). All diese Größen sind natürlich vom Ort und der Zeit abhängig, also z.B. $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t)$. \vec{E} und \vec{D} beziehungsweise \vec{B} und \vec{H} sind durch die folgenden Materialgleichungen miteinander verknüpft:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3)$$

Dabei steht \vec{P} für die elektrische Polarisation und \vec{M} für die Magnetisierung eines unter Umständen vorhandenen Mediums. ϵ_0 ⁸⁾ und μ_0 ⁹⁾ sind experimentell zugängliche Konstanten.

Da wir hier keine theoretische Elektrodynamik betreiben wollen, nehmen wir zur Vereinfachung an, daß

1. keine Ladungen und Ströme im Raum vorhanden sind, also $\rho = 0$ $\frac{C}{m^3}$ und $\vec{j} = 0$ $\frac{A}{m^2}$.

⁶⁾James Clerk Maxwell *Edinburgh 13.6.1831 †Cambridge 5.11.1879

⁷⁾ $\vec{\nabla} \times \vec{E}$ ist die Rotation, $\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ die Divergenz und $\dot{\vec{E}}$ die zeitliche Ableitung von \vec{E}

⁸⁾elektrische Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} C/Vm$

⁹⁾magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Vs/Am$

♣ Die Kenntnis dieses Kapitels ist notwendig für das Verständnis, nicht jedoch für die Versuchsdurchführung.

2. die vorkommenden Medien linear und isotrop sind, was nur bedeutet, daß z.B. die elektrische \vec{P} Polarisation eines Mediums linear vom äußeren \vec{E} -Feld abhängt. Unter Einführung von neuen Konstanten ϵ und μ , die beide dimensionslos sind, schreiben sich die Materialgleichungen dann so:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \cdot \vec{E} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \cdot \vec{H} \quad (5)$$

Man nennt ϵ die *Dielektrizitätszahl* oder *Permittivitätszahl* und μ die *relative Permeabilität* oder *Permeabilitätszahl*. Typische Werte von ϵ sind z.B. 3-15 für Glas, 81 für Wasser und 3-4 für Quarz. Für alle diese Substanzen gilt $\mu \approx 1^{10)}$.

Geht man mit diesen Vereinfachungen in die Maxwellgleichungen (1), so erhält man

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \dot{\vec{B}} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{1}{\mu\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon\epsilon_0 \dot{\vec{E}} = 0 \quad (9)$$

was zwar schon recht nett aussieht, aber immer noch ein System¹¹⁾ von acht gekoppelten partiellen linearen Differentialgleichungen ist. Irgendwann ist einmal jemand auf die Idee gekommen von der Gleichung (9) die Rotation zu bilden:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon\epsilon_0 \dot{\vec{E}} \right) &= \vec{\nabla} \times (0) \\ \frac{1}{\mu\mu_0} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) - \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}) &= 0 \end{aligned}$$

Und unter Verwendung von (8) für $\vec{\nabla} \times \vec{E}$ erhält man:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu\mu_0} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) - \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (-\dot{\vec{B}}) &= 0 \\ \frac{1}{\mu\mu_0} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) + \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{B} &= 0 \end{aligned}$$

Ein kurzes Nachschlagen in der MPIIIA-Vorlesung oder einer mathematischen Formelsammlung liefert $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \Delta \vec{B}^{12)}$, was dann wegen (6) folgendes ergibt:

¹⁰⁾Substanzen mit $\mu \geq 1000$ sind z.B. die Ferromagnetika wie Eisen. μ hängt dann aber oft stark vom Feld und der Vorgeschichte der Magnetisierung ab (Hysteresiskurve). Diese Substanzen interessieren uns hier nicht weiter, also im folgenden $\mu \approx 1$.

¹¹⁾2 Divergenzgleichungen (=2 Gleichungen) und 2 Rotationsgleichungen (=2*3=6 Gleichungen)

¹²⁾ $\Delta \vec{B}$ ist der komponentenweise genommene Laplace-Operator.

$$-\frac{1}{\mu\mu_0}\Delta\vec{B} + \epsilon\epsilon_0\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{B} = 0$$

$$\Delta\vec{B} - \epsilon\epsilon_0\mu\mu_0\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{B} = 0$$

Eine vollkommen analoge Rechnung (Mit (8) anfangen,...) liefert eine weitere Gleichung von ganz ähnlicher Bauart für das \vec{E} -Feld. Gleichungen dieser Art heißen Wellengleichungen. Wir haben zwei Wellengleichungen gefunden:

$$\Delta\vec{E} - \epsilon\epsilon_0\mu\mu_0\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{E} = 0 \quad (10)$$

$$\Delta\vec{B} - \epsilon\epsilon_0\mu\mu_0\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{B} = 0 \quad (11)$$

Aufgrund unserer Rechnung wissen wir, daß Lösungen (\vec{E} und \vec{B}) der Maxwellgleichungen auch Lösungen der Wellengleichungen (jeweils separat für \vec{E} und \vec{B}) sind. Inwieweit das Umgekehrte auch der Fall ist, werden wir später noch sehen.

2.2 Lösungen der Wellengleichung

2.2.1 Ebene Wellen

Betrachten wir zum Beispiel folgendes zeit- und ortsabhängiges \vec{E} -Feld¹³⁾:

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \vec{A}e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} \quad (12)$$

Dabei seien zunächst ω eine beliebige positive reelle Zahl, \vec{k} und \vec{A} je ein fester (im Sinne der Einfachheit) reeller Vektor¹⁴⁾.

Wir sehen durch Differenzieren (exemplarisch für die x -Komponente):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}\vec{E}(\vec{x}, t) &= \vec{A}ik_x e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} = ik_x \vec{E}(\vec{x}, t) \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2}\vec{E}(\vec{x}, t) &= -\vec{A}k_x^2 e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} = -k_x^2 \vec{E}(\vec{x}, t) \\ \frac{\partial}{\partial t}\vec{E}(\vec{x}, t) &= -\vec{A}i\omega e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} = -i\omega \vec{E}(\vec{x}, t) \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{E}(\vec{x}, t) &= -\vec{A}\omega^2 e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} = -\omega^2 \vec{E}(\vec{x}, t) \end{aligned}$$

Setzt man dies und die analogen Gleichungen für y und z in die Wellengleichung für das \vec{E} -Feld (10) ein, so erhält man:

$$\begin{aligned} \Delta\vec{E} - \epsilon\epsilon_0\mu\mu_0\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{E} &= -(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)\vec{E} + \epsilon\epsilon_0\mu\mu_0\omega^2\vec{E} \\ &= (\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0\omega^2 - (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2))\vec{E} \\ &\stackrel{(12)}{=} (\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0\omega^2 - (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2))\vec{A}e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} \\ &\stackrel{(10)}{=} 0 \end{aligned}$$

¹³⁾ $\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ und $\vec{k} = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{pmatrix}$

¹⁴⁾ Pathologische Fälle $\vec{A} = 0$, $\vec{k} = 0$ oder $\omega = 0$ seien ausgeschlossen und für die Einheiten gilt: $[\vec{A}]_{SI} = V/m$, $[\vec{k}]_{SI} = 1/m$ und $[\omega]_{SI} = 1/s$.

Nach Voraussetzung ist $\vec{A} \neq 0$ und da die Exponentialfunktion immer den Betrag eins hat, muß gelten:

$$\vec{k}^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \epsilon\epsilon_0\mu\mu_0\omega^2 \quad (13)$$

Wir haben also, wenn \vec{k} und ω die Bedingung (13) erfüllen, für beliebige \vec{A} eine Lösung der Wellengleichung für das \vec{E} -Feld gefunden. Ist die Lösung aber auch Lösung der Maxwellgleichungen? Dazu besorgt man sich zunächst ein zu unserem \vec{E} -Feld passendes \vec{B} -Feld:

$$\begin{aligned} \vec{B} &\stackrel{(8)}{=} -\vec{\nabla} \times \vec{E} \\ &= -\vec{\nabla} \times (\vec{A}e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)}) \\ &\stackrel{15)}{=} -e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)}(\vec{\nabla} \times \vec{A}) - (\vec{\nabla}e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)}) \times \vec{A} \\ \stackrel{\vec{\nabla} \times \vec{A}=0}{=} & -(\vec{\nabla}e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)}) \times \vec{A} \\ &= -(ie^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)}\vec{k}) \times \vec{A} \\ &= -i(\vec{k} \times \vec{A})e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} \end{aligned}$$

Also¹⁶⁾:

$$\vec{B}(\vec{x}, t) = \frac{1}{\omega}(\vec{k} \times \vec{A})e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} \quad (14)$$

Man überzeugt sich leicht, daß \vec{E} und \vec{B} die letzte (9) der Maxwellgleichungen erfüllen. Interessant sind noch die beiden Divergenzgleichungen (6) und (7). Man erhält nämlich

$$\begin{aligned} 0 &= \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \stackrel{17)}{=} \vec{A} \cdot (\vec{\nabla}e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)}) = i(\vec{A} \cdot \vec{k})e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} \\ 0 &= \vec{\nabla} \cdot \vec{B} \stackrel{17)}{=} \frac{1}{\omega}(\vec{k} \times \vec{A}) \cdot (\vec{\nabla}e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)}) = \frac{i}{\omega}((\vec{k} \times \vec{A}) \cdot \vec{k})e^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} \end{aligned}$$

Wieder mit dem Argument, daß obige Gleichungen für alle Zeiten und Orte erfüllt sein sollen, sind obige Bedingungen äquivalent zu

$$(\vec{A} \cdot \vec{k}) = 0 = ((\vec{k} \times \vec{A}) \cdot \vec{k}) \quad (15)$$

wobei die rechte Seite immer erfüllt ist, denn es handelt sich um ein Spatprodukt mit gleichen Vektoren. Die linke Seite bedingt eine spezielle Wahl von \vec{A} und \vec{k} : Aus $\vec{A} \cdot \vec{k} = 0$ folgt, daß $\vec{A} \perp \vec{k}$ sein muß, also $\vec{E} \perp \vec{k}$.

Somit: **Nicht jede Lösung der Wellengleichung ist automatisch eine Lösung der Maxwellgleichungen!**

¹⁵⁾Analysis-Vorlesung oder Bronstein, Seite 574: $\vec{\nabla} \times (\lambda\vec{A}) = \lambda(\vec{\nabla} \times \vec{A}) + (\vec{\nabla}\lambda) \times \vec{A}$

¹⁶⁾Ein zeitlich konstantes \vec{B} -Feld interessiert uns nicht. Wir setzten daher die Integrationskonstante ohne Einschränkung gleich Null!

¹⁷⁾Kettenregel für die Divergenz: $\vec{\nabla} \cdot \lambda\vec{A} = \lambda(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) + (\vec{\nabla}\lambda) \cdot \vec{A}$

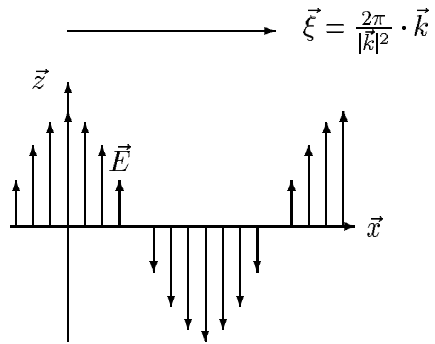


Abbildung 1: Ebene Welle $t = 0$

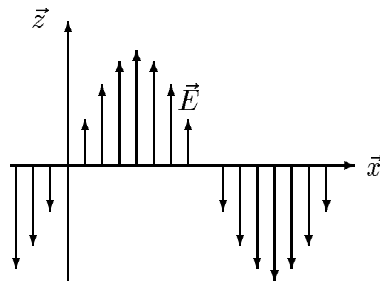


Abbildung 2: Ebene Welle $t = \frac{\pi}{2\omega}$

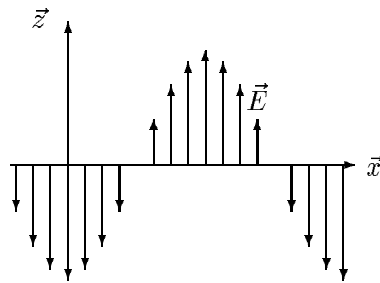


Abbildung 3: Ebene Welle $t = \frac{\pi}{\omega}$

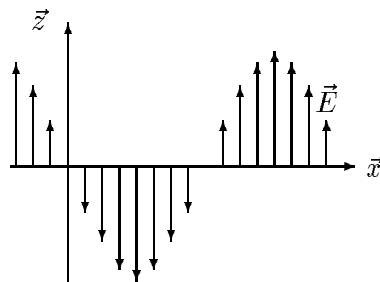


Abbildung 4: Ebene Welle $t = \frac{3\pi}{2\omega}$

Nun haben wir genug gerechnet, kommen wir zur

Interpretation:

Betrachtet man unser \vec{E} -Feld (12), so stellt man fest, daß es natürlich komplex werden kann. Physikalische Bedeutung jedoch hat nur der Realteil von (12). Diesen wollen wir uns jetzt näher anschauen: Wann immer wir in Zukunft \vec{E} schreiben meinen wir also $Re(\vec{E})$.

Das ωt im Exponenten erzeugt nur eine zeitliche Oszillation des \vec{E} -Feldes mit der Frequenz $f = \frac{\omega}{2\pi}$. Diese Oszillation ist für alle Punkte im Raum gleich. Nur die Phase der Schwingung ist von Raumpunkt zu Raumpunkt wegen des $\vec{k} \cdot \vec{x}$ -Termes verschieden.

Betrachten wir nun z.B. einen Vektor $\vec{k} = \begin{pmatrix} k \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ und ein beliebiges positives ω . In

den Abbildungen 1 bis 4 sind zu verschiedenen, aufeinanderfolgenden Zeitpunkten, die \vec{E} -Vektoren entlang der \vec{x} -Achse dargestellt.

Wegen (15) müssen die \vec{E} -Vektoren senkrecht auf dem \vec{k} -Vektor stehen. Wir haben uns hier ohne Einschränkung auf die \vec{z} -Richtung festgelegt. Das \vec{E} -Feld ist also unabhängig von y und z ¹⁸⁾.

Sieht man sich die Abbildungen näher an, so erkennt man, daß sich das Maximum des elektrischen Feldes mit der Zeit nach rechts bewegt. Die Ebenen maximaler elektrischer Feldstärke bewegen sich also von links nach rechts in Richtung des \vec{k} -Vektors. Wegen dieser Eigenschaft heißen diese Lösungen der Wellengleichung „ebene Wellen“. Man nennt \vec{k} den Wellenzahlvektor und ω die Kreisfrequenz. Abbildung 5 veranschaulicht die Zusammenhänge. Außerdem ist in Abbildung 5 schon berücksichtigt, was wir aus Gleichung (14) wissen, nämlich daß

1. das \vec{B} -Feld senkrecht auf \vec{k} und \vec{E} steht (weil $\vec{E} \perp \vec{k}$ wegen (15)).
2. das \vec{B} -Feld phasengleich zum \vec{E} -Feld schwingt.

Unsere ebenen Wellen sind transversale Wellen¹⁹⁾, worunter man versteht, daß $\vec{E} \perp \vec{k} \perp \vec{B} \perp \vec{E}$. Abbildung 6 macht das klar. (\vec{k} wieder in \vec{x} -Richtung)

Unsere Beispielwelle war außerdem linear in \vec{z} -Richtung polarisiert. Dabei ist es Konvention, die Polarisation einer Lichtwelle immer als die Richtung des \vec{E} -Feldes anzugeben. Jede beliebige Polarisationsrichtung ist möglich, solange sie senkrecht auf \vec{k} steht.

Der Abstand von einem Maximum der Feldstärke zum nächsten Maximum ist die Wellenlänge der Welle. Sie berechnet sich (nach Abb. 1) zu:

$$\lambda = \frac{2\pi}{|\vec{k}|} \quad (16)$$

Oben haben wir von einer Ausbreitungsgeschwindigkeit der ebenen Welle gesprochen. Dabei war die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenfronten (=Ebenen

¹⁸⁾ $\vec{k} \cdot \vec{x}$ ist nichts anderes, als die Projektion von \vec{x} auf \vec{k} und \vec{k} zeigt in z -Richtung.

¹⁹⁾ Licht ist im Bereich der linearen Optik immer eine transversale Welle!

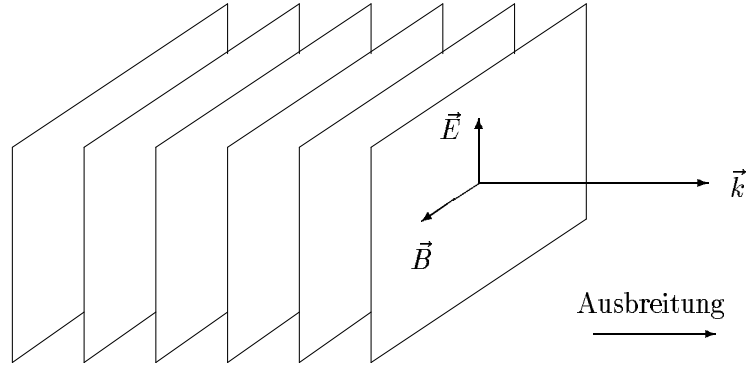


Abbildung 5: Maximale Feldstärke in einer ebenen Welle

maximalen \vec{E} -Feldes) gemeint. Diese Geschwindigkeit nennt man auch „Phasengeschwindigkeit“. Sie läßt sich ausrechnen, indem man sich die Bedingung für ein Maximum z.B. des \vec{E} -Feldes ansieht:

$$v_{\text{Licht}} = \frac{\omega}{|\vec{k}|} \stackrel{(13)}{=} \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu\epsilon_0\mu_0}} \quad (17)$$

Man führt eine neue Materialkonstante, den Brechungsindex n , ein, die angibt, wie schnell sich die Welle im Vergleich zur Ausbreitung im Vakuum ausbreitet. Aus (17) ergeben sich die wichtigen Gleichungen:

$$\begin{aligned} c &:= v_{\text{Vakuum}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} & \epsilon = \mu = 1 \\ n &:= \frac{c}{v_{\text{Medium}}} = \sqrt{\epsilon\mu} \end{aligned} \quad (18)$$

2.2.2 Kugelwellen

Weitere Lösungen²⁰⁾ der Wellengleichung -mit Ausnahme des Nullpunktes- lauten:

$$\begin{aligned} \vec{E}_+(\vec{x}, t) &= \vec{A}_+(\vec{x}) \frac{1}{|\vec{x}|} e^{i(k|\vec{x}|+\omega t)} \\ \vec{E}_-(\vec{x}, t) &= \vec{A}_-(\vec{x}) \frac{1}{|\vec{x}|} e^{i(k|\vec{x}|-\omega t)} \end{aligned}$$

wobei ω und k beliebige positive reelle Zahlen seien. $\vec{A}_+(\vec{x})$ und $\vec{A}_-(\vec{x})$ seien beliebige vorgegebene Vektorfelder ungleich Null, die *NUR VON DER RAUMRICHTUNG* abhängen²¹⁾.

Es ergeben sich im wesentlichen die gleichen Ergebnisse wie bei ebenen Wellen, nur daß die Rechnung in Polarkoordinaten etwas umständlicher ist. Aus diesem Grunde wollen wir darauf verzichten und gleich feststellen:

²⁰⁾Der geneigte Leser (mit Zielrichtung " theoretische Physik ") möge das selbst nachrechnen. Verwenden Sie dabei Polarkoordinaten. In Polarkoordinaten (r, ϕ, θ) hat der Laplace-Operator die Darstellung: $\Delta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right)$

²¹⁾Also $\vec{A}_{\pm}(\vec{x}) = A_{\pm} \left(\frac{\vec{x}}{|\vec{x}|} \right)$.

1. Auch Kugelwellen sind Transversalwellen, was eine Bedingung an $\vec{A}_{\pm}(\vec{x})$ darstellt: Für alle \vec{x} muß gelten²²⁾: $\vec{A}_{\pm}(\vec{x}) \cdot \vec{x} = 0$.
2. \vec{B} und \vec{E} schwingen ebenfalls phasengleich.
3. Die Gleichungen (18) gelten ebenso.
4. Es gibt eine weitere notwendige Bedingung an \vec{A}_{\pm} , damit die Wellengleichung erfüllt ist.²³⁾

Interpretation:

Betrachtet man ähnliche Bilder wie schon bei den ebenen Wellen, so stellt man fest, daß sich die Wellen jetzt nicht in eine feste Richtung ausbreiten, sondern vom Ursprung aus in alle Richtungen. Dabei findet ein zu $\frac{1}{r}$ proportionales Abklingen statt²⁴⁾. Die Flächen maximalen Feldes sind also konzentrische Kugeln.

Eine Momentaufnahme zu einer bestimmten Zeit t_1 zeigt Abbildung 7. Dabei wurde nur das Feld auf der \vec{x} -Achse gezeichnet. Abbildung 8 zeigt einen späteren Zeitpunkt t_2 . Es wurde in beiden Fällen \vec{E}_- zugrundegelegt.

Bei \vec{E}_- wandert die Welle von innen nach außen. Man nennt die Welle auch auslaufende Kugelwellen. Bei \vec{E}_+ dagegen laufen die Wellen von außen nach innen. Sie heißen auch einlaufende Kugelwellen. Diese treten in der Praxis jedoch nicht auf.

2.3 Zusammenfassung

Wir haben, ausgehend von den Maxwellgleichungen, die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen betrachtet und dabei festgestellt, daß die durch Umformung der Maxwellgleichungen entstehende Wellengleichung zwar praktisch ist, aber nicht hinreichend dafür, daß das erhaltene Feld auch die Maxwellgleichungen erfüllt.

Desweiteren haben wir ebene Wellen und Kugelwellen behandelt und dabei, sozusagen als Abfall, einige fundamentale Gleichungen der Optik bezüglich Ausbreitungsgeschwindigkeit und Brechungsindex von linearen Medien erhalten. Ferner haben unsere Beispiele gezeigt, daß Lichtwellen Transversalwellen sind.

Merken sollten wir uns die zwei wichtigsten Arten von elektromagnetischen Wellen:

1. Ebene Wellen:

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \vec{A}e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)}$$

2. Kugelwellen:

$$\begin{aligned} \text{Auslaufende:} \quad \vec{E}_+(\vec{x}, t) &= \vec{A}_+(\vec{x}) \frac{1}{|\vec{x}|} e^{i(k|\vec{x}| + \omega t)} \\ \text{Einlaufende:} \quad \vec{E}_-(\vec{x}, t) &= \vec{A}_-(\vec{x}) \frac{1}{|\vec{x}|} e^{i(k|\vec{x}| - \omega t)} \end{aligned}$$

²²⁾Man erhält dies wie bei den ebenen Wellen wiederum aus der Divergenzgleichung (6).

²³⁾ \vec{A}_{\pm} muß den Winkelabhängigen Teil des Laplace-Operators zu Null machen.

²⁴⁾Dadurch ist die Energieerhaltung gesichert: Die in der Welle transportierte Energie ist proportional zu $|\vec{E}|^2$, also muß \vec{E} mit $\frac{1}{r}$ abnehmen, da die Oberfläche einer Kugel mit r^2 zunimmt.

wobei die einlaufenden Kugelwellen keine praktische Bedeutung haben²⁵⁾.

Wichtig sind diese (doch eigentlich recht speziellen) Typen, da die Maxwellgleichungen linear sind und man Lösungen beliebig addieren kann und dabei wieder Lösungen erhält. Man nennt dies das „Superpositionsprinzip“. Deshalb ist es möglich durch Überlagerung vieler einfacher Wellen unterschiedlicher Amplitude und Phase nahezu jede vorgegebene Welle zusammenzubasteln.

2.4 Denkanstöße

1. Wir haben Licht als Welle behandelt. Ist das zulässig? Führen Sie folgendes (sehr heuristisches) Gedankenexperiment aus:

Der im Versuch verwendete Laser hat eine Leistung von $2mW$, und er sendet Lichtteilchen (Photonen) der Wellenlänge $632.8nm$ aus. Wieviele Photonen pro Sekunde sind das im Mittel? Nehmen Sie an, daß die Photonen etwa die Größe einer Wellenlänge haben. Wieviele Photonen sind „gleichzeitig“ unterwegs, wenn man annimmt, daß die Photonen regelmäßig „abgefeuert“ werden? Wird man etwas vom „Teilchencharakter“ des Lichtes merken?

2. Vollziehen Sie die Herleitung der Wellengleichung nach, indem Sie die Wellengleichung für das \vec{E} -Feld herleiten.
3. Berechnen Sie die Geschwindigkeit, mit der sich die Feldmaxima bei ebenen Wellen fortbewegen. (\rightarrow (17))
4. Berechnen Sie c und den Brechungsindex von Wasser²⁶⁾ mittels (18). Woher könnte die schlechte Übereinstimmung²⁷⁾ beim Wasser kommen?

²⁵⁾So etwas kommt in der Realität nicht vor. Man kann aber mit einer unendlichen Linearkombination von ein- und auslaufenden Kugelwellen ebene Wellen zusammenbasteln und damit Aussagen über den Drehimpuls eines Photons machen.

²⁶⁾ $n_{H_2O} \approx 1.3$

²⁷⁾Siehe z.B. [3], Seite 59.

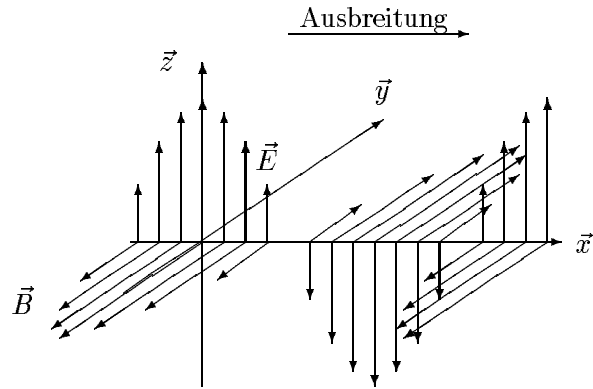


Abbildung 6: Transversale, ebene Welle

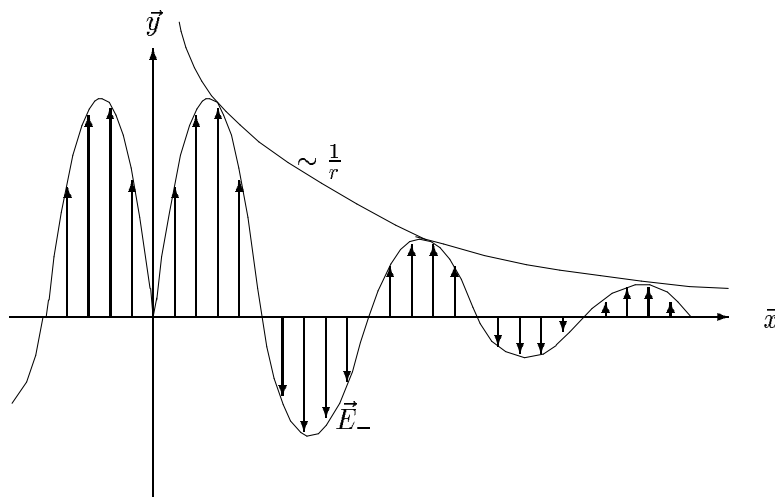


Abbildung 7: Kugelwelle zur Zeit t_1

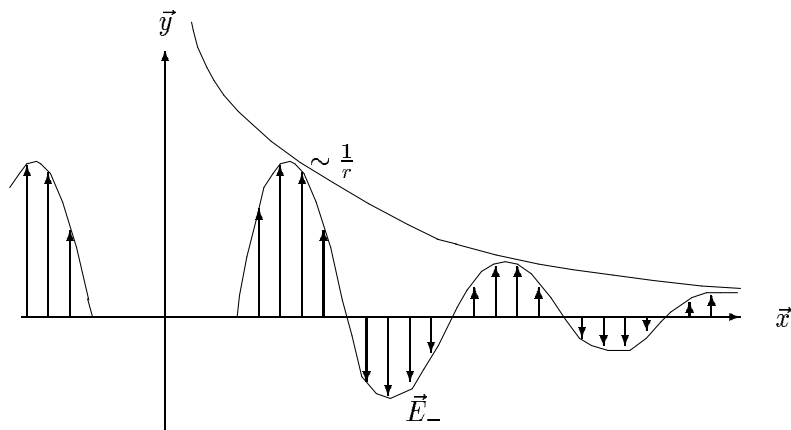


Abbildung 8: Kugelwelle zur Zeit t_2

3 Die Interferenz ♣

3.1 Experimentelle Anordnungen

Zur Einstimmung sollen zunächst einige Experimente aufgezählt werden, die für die Beobachtung von Interferenz von praktischem Interesse sind:

3.1.1 Das Michelson-Interferometer

Das Michelson-Interferometer ist das wohl bekannteste Experiment zur Beobachtung von Interferenz. Da dieses Experiment

1. in der Optik-Vorlesung immer recht breitgetreten wird
2. später noch einmal vorkommen wird

verzichten wir hier auf eine detaillierte Darstellung²⁸⁾.

3.1.2 Der Fresnel-Spiegel

Hier beleuchtet man z.B. mit einem Laser einen Spiegel, der in der Mitte einen Knick aufweist. In Abbildung 9 ist der Knick stark übertrieben: In der Praxis beträgt der Winkel weniger als ein Grad.

Je nach Art der Lichtquelle ergeben sich unterschiedliche Interferenzmuster in dem Überlappungsbereich. Besser versteht man diesen Spiegelversuch, wenn man statt der einen Lichtquelle und den komplizierten gespiegelten Lichtstrahlen einfach die beiden virtuellen Lichtquellen L_1' und L_1'' einzeichnet. (Siehe Abbildung 10).

3.1.3 Newton-Ringe

Betrachtet man z.B. eine Folie auf dem Tageslichtprojektor oder im Neon-Licht, so sieht man oft seltsame, bunte Muster. Diese kommen durch Interferenz von Licht, das mehrfach reflektiert wurde, zustande. Der Gangunterschied wird bestimmt durch die Dicke der Folie. Man nennt diese Art von Interferenz auch „Interferenz gleicher Dicke“ oder „Fizeau-Interferenz“. Um die Muster zu sehen, müssen Sie ihr Auge z.B. auf die Folie scharfstellen. (Optimal ist der Effekt der Interferenzen im monochromatischen Licht zu sehen, wenn man eine Konvexlinse auf eine Glasplatte legt. Das Muster ist dann aber nicht farbig!)

3.2 Interferenz bei ebenen Wellen

Betrachten wir zunächst zwei beliebige linear polarisierte ebene Wellen $E_1(\vec{x}, t)$ und $E_2(\vec{x}, t)$ mit zugehörigen reellwertigen Amplituden \vec{A}_1 und \vec{A}_2 , Kreisfrequenzen ω_1 und ω_2 , sowie den Wellenzahlvektoren \vec{k}_1 und \vec{k}_2 :

²⁸⁾Hat der Leser das Gefühl, nicht mit der Materie vertraut zu sein, so seien [3] und [2] empfohlen.

♣ Die Kenntnis dieses Kapitels ist notwendig für das Verständnis, nicht jedoch für die Versuchsdurchführung.

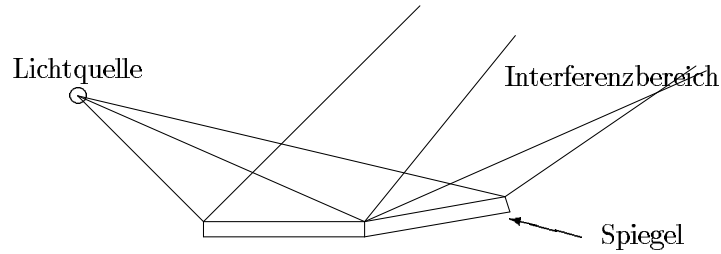


Abbildung 9: Fresnel-Spiegel 1

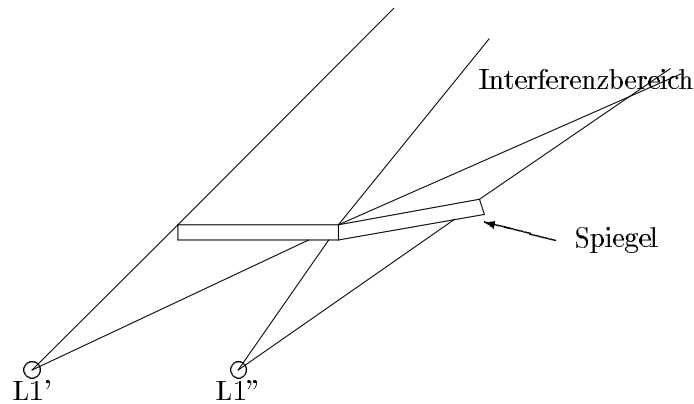


Abbildung 10: Fresnel-Spiegel 2

$$\begin{aligned}\vec{E}_1(\vec{x}, t) &= \vec{A}_1 e^{i(\vec{k}_1 \cdot \vec{x} - \omega_1 t)} \\ \vec{E}_2(\vec{x}, t) &= \vec{A}_2 e^{i(\vec{k}_2 \cdot \vec{x} - \omega_2 t)}\end{aligned}$$

Was passiert, wenn sich diese beiden ebenen Wellen überlagern?

Da die Maxwellgleichungen linear sind (\Rightarrow „Summe von Lösungen ist wieder Lösung“) können wir die beiden \vec{E} -Felder einfach addieren. Bei der Beobachtung kommt es aber nicht auf das \vec{E} -Feld an, sondern auf die Intensität. Aus der Optik wissen wir, daß die Intensität proportional zum zeitlichen Mittel (bezeichnet mit $\langle \cdot \rangle_t$) des Betragsquadrates des elektrischen Feldes ist. Also berechnen wir die Intensitätsverteilung unserer Überlagerung wie folgt:

$$\begin{aligned}I(\vec{x}) &\sim \left\langle |\vec{E}_1(\vec{x}, t) + \vec{E}_2(\vec{x}, t)|^2 \right\rangle_t \\ &= \left\langle (\vec{E}_1(\vec{x}, t) + \vec{E}_2(\vec{x}, t)) \cdot (\vec{E}_1(\vec{x}, t) + \vec{E}_2(\vec{x}, t))^* \right\rangle_t \quad 29) \\ &= \left\langle \vec{E}_1(\vec{x}, t) \cdot \vec{E}_1^*(\vec{x}, t) + \vec{E}_1(\vec{x}, t) \cdot \vec{E}_2^*(\vec{x}, t) + \vec{E}_2(\vec{x}, t) \cdot \vec{E}_1^*(\vec{x}, t) + \vec{E}_2(\vec{x}, t) \cdot \vec{E}_2^*(\vec{x}, t) \right\rangle_t \\ &= \left\langle |\vec{E}_1(\vec{x}, t)|^2 + |\vec{E}_2(\vec{x}, t)|^2 + 2\Re(\vec{E}_1(\vec{x}, t) \cdot \vec{E}_2^*(\vec{x}, t)) \right\rangle_t \quad 30) \quad (19)\end{aligned}$$

Nun sehen wir etwas Unerwartetes: Die Intensitäten addieren sich *NICHT* einfach, sondern es kommt noch ein Term $2\Re(\vec{E}_1(\vec{x}, t) \cdot \vec{E}_2^*(\vec{x}, t))$ zum Vorschein. Dieser ist für das spezielle Verhalten, die Interferenz, verantwortlich und lautet ausgeschrieben:

$$\begin{aligned}\Re(\vec{E}_1(\vec{x}, t) \cdot \vec{E}_2^*(\vec{x}, t)) &= \Re(\vec{A}_1 e^{i(\vec{k}_1 \cdot \vec{x} - \omega_1 t)} \cdot (\vec{A}_2 e^{i(\vec{k}_2 \cdot \vec{x} - \omega_2 t)})^*) \\ &= \Re(\vec{A}_1 \cdot \vec{A}_2 e^{i((\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{x} - (\omega_1 - \omega_2)t)}) \\ &= \vec{A}_1 \cdot \vec{A}_2 \Re(e^{i((\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{x} - (\omega_1 - \omega_2)t)})\end{aligned}\quad (20)$$

Wollen wir Interferenz sehen, so muß insbesondere $\vec{A}_1 \cdot \vec{A}_2$ von Null verschieden sein. Dies bedeutet aber genau, daß die beiden Wellen nicht senkrecht zueinander polarisiert sein dürfen. Wir erkennen: Die Interferenz ist am ausgeprägtesten, wenn die beide Wellen *gleich polarisiert* sind.

Ferner können wir Interferenz mit dem Auge oder einem Filmmaterial nur dann beobachten, wenn sich die entstehenden Muster mit der Zeit nicht schnell verändern. Das impliziert wegen (20), daß $|\omega_1 - \omega_2|$ sehr klein sein muß. In der Praxis ist Interferenz nur dann zu beobachten, wenn die *Frequenzen* der interferierenden Lichtstrahlen *gleich* sind³¹⁾.

Geht man nun also davon aus, daß

1. beide Wellen parallele Polarisation haben,
2. die Frequenz beider Wellen gleich ist,

so können wir (indem wir (20) in (19) einsetzen) die Gesamtintensität schreiben als³²⁾

$$I(\vec{x}) \sim I_1(\vec{x}) + I_2(\vec{x}) + 2\sqrt{I_1(\vec{x})I_2(\vec{x})} \cos((\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{x} + \Delta\phi) \quad (21)$$

Interpretation:

Betrachten wir die Formel (21), so erkennen wir:

²⁹⁾Ein hochgestellter Stern bedeutet komplexe Konjugation.

³⁰⁾ $\Re(x)$ bezeichnet den Realteil von x .

³¹⁾Mit großem technischen Aufwand wäre es möglich, zwei Laser zu bauen, deren Frequenz sich um nur 1Hz unterscheidet. Damit wäre dann die zeitliche Oszillation des Interferenzmusters zu sehen.

³²⁾Der aufmerksame Leser wird bemerkt haben, daß wir etwas gemogelt haben, denn unsere ebenen Wellen schwingen am Ursprung immer gleichphasig, obwohl das nicht immer so sein muß. Um dem Rechnung zu tragen, hätten wir noch konstante Phasen-Terme ϕ_1 und ϕ_2 einfügen müssen:

$$\begin{aligned}\vec{E}_1(\vec{x}, t) &= \vec{A}_1 e^{i(\vec{k}_1 \cdot \vec{x} - \omega_1 t + \phi_1)} \\ \vec{E}_2(\vec{x}, t) &= \vec{A}_2 e^{i(\vec{k}_2 \cdot \vec{x} - \omega_2 t + \phi_2)}\end{aligned}$$

Als Ergebnis ergibt sich dann (die Rechnung geht exakt wie oben durchgeführt):

$$I(\vec{x}) \sim I_1(\vec{x}, t) + I_2(\vec{x}, t) + 2\sqrt{I_1(\vec{x}, t)I_2(\vec{x}, t)} \cos((\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{x} + \Delta\phi)$$

Wobei $\Delta\phi$ definiert ist durch $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$.

³²⁾Für alle reellen x gilt nach Definition: $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$.

1. Die Intensitäten addieren sich nicht einfach, sondern es kommt noch ein oszillierender Term hinzu.
2. Die Intensität bleibt stets positiv.³³⁾

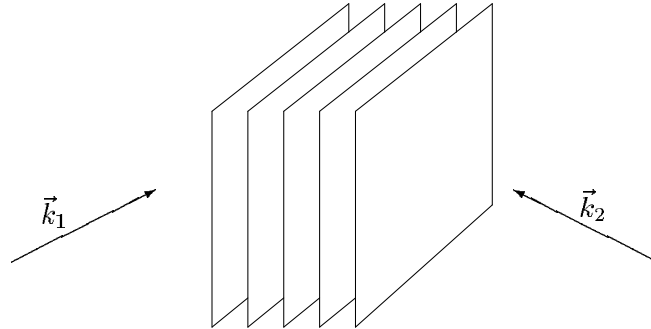


Abbildung 11: Ebenen maximaler Intensität

3. Die Bedingung für Flächen maximaler Intensität lautet:

$$\cos\left((\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{x} + \Delta\phi\right) = 1 \quad (22)$$

Man erkennt, daß sich parallele Ebenen ergeben (analoge Argumentation wie bei den „ebenen Wellen“), die auf $\vec{k}_1 - \vec{k}_2$ senkrecht stehen. Abbildung 11 soll dies illustrieren. Hält man einen Schirm in diesen Bereich, so werden darauf äquidistante Streifen sichtbar.

4. Der Abstand zweier Ebenen maximaler Intensität beträgt (da die Ebenen alle senkrecht auf $\vec{k}_1 - \vec{k}_2$ stehen) $d = \frac{2\pi}{|\vec{k}_1 - \vec{k}_2|}$. Beachtet man, daß die Wellen gleiche Frequenz haben, so folgt nach (13), daß auch die Beträge der \vec{k} -Vektoren gleich sein müssen. Die Situation ist in Abbildung 12 dargestellt. Führt man auch noch den Winkel θ zwischen den \vec{k} -Vektoren ein, so ergibt sich nach dem allgemeinen Satz von Pythagoras³⁴⁾:

$$\begin{aligned} |\vec{k}_1 - \vec{k}_2| &= \sqrt{|\vec{k}_1|^2 + |\vec{k}_1|^2 - 2|\vec{k}_1||\vec{k}_1|\cos(\theta)} \\ &= |\vec{k}_1| \sqrt{2 - 2\cos(\theta)} \\ &= \underbrace{\frac{2\pi}{\lambda}}_{=|\vec{k}_1| \text{ nach Gl. (16)}} \sqrt{2 - 2\cos(\theta)} \quad 35) \end{aligned}$$

Damit ergibt sich dann der Abstand zwischen den Interferenzmaxima zu

$$d = \frac{\lambda}{\sqrt{2 - 2\cos(\theta)}}$$

³³⁾Die ist zwar klar, da sie als Betragsquadrat definiert ist, aber man sieht es auch so: Nach MIA gilt die Ungleichung vom arithmetischen und geometrischen Mittel: $\frac{x+y}{2} \leq \sqrt{xy}$ für beliebige reelle x und y . Da für alle reellen x gilt $\cos(x) \in [-1, 1]$ sind wir gerettet.

³⁴⁾ $c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$

³⁵⁾ $|\vec{k}_1| = |\vec{k}_2| \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 =: \lambda$

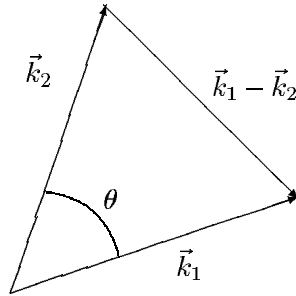


Abbildung 12: Wellenvektoren

3.3 Interferenz bei Kugelwellen

Betrachtet man statt ebenen Wellen Kugelwellen, so kann man ebenfalls ausrechnen, was bei deren Überlagerung passiert. Die Rechnung ist wesentlich komplizierter, so daß wir uns auf den in Abbildung 13 gezeigten Spezialfall konzentrieren wollen:

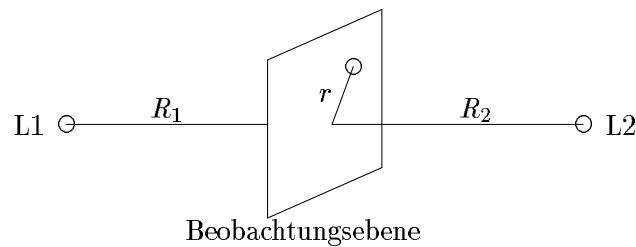


Abbildung 13: Überlagerung von Kugelwellen

Betrachten wir zwei Punktlichtquellen L1 bzw. L2, die beide Kugelwellen gleicher Frequenz und Phase aussenden. Wir beobachten die Intensitätsverteilung in einer Ebene, die senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Lichtquellen verläuft. Die Lichtquellen haben von dieser Ebene die Abstände R_1 bzw. R_2 ³⁶⁾.

Die Wegdifferenz für einen Punkt, der von der Symmetrieachse den Abstand r hat, ergibt sich zu

$$d \approx \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot r^2 \quad (23)$$

wobei man davon ausgehen muß, daß $r \ll R_1$ und $r \ll R_2$ ³⁷⁾.

In der Beobachtungsebene beobachten wir ein Intensitätsmaximum, wenn der Gangunterschied d vielfache von der Wellenlänge λ beträgt. Ergo lautet die Bedingung für den Radius r_m des m -ten Intensitätsmaximums:

$$m\lambda = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot r_m^2$$

³⁶⁾Ohne Einschränkung: $R_1 < R_2$.

³⁷⁾Man bezeichnet dies als gaußsche Näherung.

$$\Rightarrow r_m^2 = 2m\lambda \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

Als Interferenzmuster ergeben sich also konzentrische Kreise, die nach außen hin immer dichter beisammen liegen.

In der Literatur werden die entstehenden Ringe auch „Fresnelsche Zonen“ genannt. Dabei wird sowohl der helle, als auch der dunkle Bereich als je eine Zone gezählt. Der Gangunterschied zwischen zwei Fresnel-Zonen beläuft sich also auf $\frac{\lambda}{2}$. Entsprechend ergibt sich für den Radius der m -ten Fresnelzone:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}m\lambda &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot \left(r_m^{\text{Fresnel}} \right)^2 \\ \Rightarrow \left(r_m^{\text{Fresnel}} \right)^2 &= m\lambda \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \\ \Rightarrow r_m^{\text{Fresnel}} &= \sqrt{m\lambda \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}} \end{aligned} \quad (24)$$

Das ganze entstehende „Gebilde“ heißt „Fresnelsche Zonenplatte“. Eine oft anzutreffende Vereinfachung ist die, daß man annimmt, eine der Lichtquellen läge im Unendlichen. Das entspricht dem Fall, daß wir eine Kugelwelle mit einer ebenen Welle überlagern. Für den Radius der m -ten Fresnelzone ergibt sich dann eine ganz einfache Formel ($R_2 \rightarrow \infty$):

$$r_m^{\text{Fresnel}} = \sqrt{m\lambda R_1} \quad (25)$$

3.4 Kohärenz

Interferenzeffekte lassen sich optimal mit einem Laser beobachten, da dieser

1. monochromatisch ist, also Licht in einem sehr engen Wellenlängenbereich aussendet.
2. eine gute zeitliche Kohärenz aufweist.

Was hat es mit der Kohärenz auf sich? Im obigen Theorieteil sind wir stets davon ausgegangen, daß wir Lichtquellen haben, die kontinuierlich und endlos ihr Licht aussenden. Dies ist bei Lichtquellen des täglichen Lebens aber nicht der Fall. Diese senden in der Regel immer nur „Bruchstücke“ aus, die eine rein zufällige Phasenlage haben. Solche Bruchstücke ergeben bei der Interferenz ein totales Chaos, so daß wir vom Interferenzmuster nichts mehr sehen können.

Die Kohärenzzeit τ_c ist ein Maß dafür, wie lange eine Lichtquelle strahlt, ohne daß sich die Phase ändert. Daraus ergibt sich die Kohärenzlänge l_c , die Länge eines zusammenhängenden Wellenzuges, zu $l_c = c\tau_c$.

Eine brauchbare Interferenz können wir nur erwarten, wenn der Gangunterschied der interferierenden Lichtstrahlen kleiner als l_c ist.

Nun haben wir mit dem Laser eine Lichtquelle, deren Kohärenzlänge nicht nur ein paar hundert Nanometer beträgt, wie bei der normalen Glühlampe, sondern im Bereich etlicher Zentimeter liegt.

3.5 Denkanstöße

1. Leiten Sie die Formel (23) her, oder schlagen Sie die Herleitung in der Literatur nach.
2. Wie würde sich eine unterschiedliche Phase der beiden Lichtquellen in Abb. 13 auf das Interferenzmuster auswirken?
3. Überlegen Sie sich (notfalls mit Literatur) wie die eingangs beschriebenen Interferenzerscheinungen zustandekommen. Und erläutern Sie welche Muster entstehen.

4 Holografie

4.1 Theorie

Im Gegensatz zur Fotografie, die ja nur zweidimensionale Bilder liefert, ist es möglich mit holografischen Methoden wirklich dreidimensionale „Bilder“ zu erzeugen. Verständlicherweise ist dabei natürlich die Aufnahmetechnik verschieden von der der Fotografie:

Wenn man ein Hologramm aufnimmt, dann geht man so vor, daß man auf einem Film das Interferenzmuster aufnimmt, das entsteht wenn die vom Objekt reflektierten Lichtwellen (der sogenannte „Objektstrahl“) mit direkt von der Lichtquelle kommenden Lichtwellen (dem sogenannten „Referenzstrahl“) zusammentreffen.

Um die Theorie der Holografie zu verstehen, nehmen wir jetzt gedanklich ein „Trivial“-Hologramm auf: Sowohl der Objekt- als auch der Referenzstrahl seien ebene Wellen. Der Film sei die (\vec{x}, \vec{y}) -Ebene. Die Objektwelle falle parallel zur \vec{z} -Achse ein, während die Referenzwelle mit $\phi = 45^\circ$ Neigung zur Objektwelle ebenfalls in der (\vec{x}, \vec{z}) -Ebene ein falle. (\rightarrow Abb. 14)

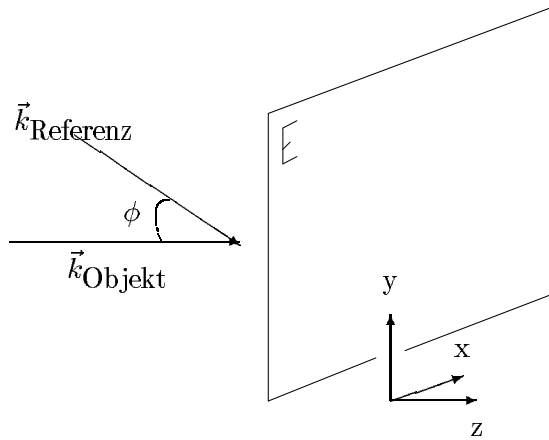


Abbildung 14: Situation bei der Hologrammaufnahme

Wie sieht das Interferenzmuster aus? Setzen wir einfach unsere Werte in (21) ein³⁸⁾:

$$\begin{aligned}
 I(\vec{x}) &= I_{\text{Ref}} + I_{\text{Obj}} + \\
 &+ 2\sqrt{I_{\text{Ref}}I_{\text{Obj}}} \cos\left((\vec{k}_{\text{Ref}} - \vec{k}_{\text{Obj}}) \cdot \vec{x}\right) \\
 \stackrel{|\vec{k}_{\text{Ref/Obj}}|=k}{=} & I_{\text{Ref}} + I_{\text{Obj}} + \\
 &+ 2\sqrt{I_{\text{Ref}}I_{\text{Obj}}} \cos\left(k \left(\begin{pmatrix} \sqrt{\frac{1}{2}} \\ 0 \\ \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \cdot \vec{x}\right) \\
 \stackrel{\vec{x}=(x,y,0)}{=} & I_{\text{Ref}} + I_{\text{Obj}} + 2\sqrt{I_{\text{Ref}}I_{\text{Obj}}} \cos\left(k\sqrt{\frac{1}{2}} \cdot x\right) \quad (26)
 \end{aligned}$$

³⁸⁾Der konstante Phasenterm sei o.E. Null.

Wir erhalten also ein Muster von vertikalen Streifen, die untereinander den Abstand $\frac{2\pi}{k\sqrt{\frac{1}{2}}}$ ⁽¹⁶⁾ $\sqrt{2}\lambda$ haben.

Das Streifenmuster hat einen Kontrast ³⁹⁾ K von

$$\begin{aligned}
 K &:= \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \\
 &\stackrel{(26)}{=} \frac{4\sqrt{I_{Ref}I_{Obj}}}{2I_{Ref} + 2I_{Obj}} \\
 &= \frac{2\sqrt{I_{Ref}I_{Obj}}}{I_{Ref} + I_{Obj}} \\
 &\stackrel{\eta := \frac{I_{Ref}}{I_{Obj}}}{=} \frac{2\sqrt{\eta}}{1 + \eta} \tag{27}
 \end{aligned}$$

Beim Kontrast des Interferenzmusters kommt es also auf das Verhältnis der beiden Strahlintensitäten an. Optimal wäre ein maximaler Kontrast von $K = 1$. Dieser ist bei $\eta = 1$, also gleicher Strahlintensität erreicht. In der Holografie wählt man aber den Referenzstrahl gerne heller als den Objektstrahl. (Überlegen Sie, woran das liegen könnte!)

Nun nehmen wir an, das Muster sei mit maximalem Kontrast auf einem Film aufgezeichnet. Das Ergebnis ist ein Gitter, das keine scharfen sondern weiche, kosinusförmige Amplitudentransparenz hat. Im Gegensatz zum Gitter mit „scharfen“ Kanten gibt es bei diesem Gitter nur die Intensitätsmaxima der Ordnungen -1, 0 und 1. Für den Beweis⁴⁰⁾ sei der Leser z.B. auf [3] verwiesen.

Für die holografische Anwendung hat das folgende Auswirkung: Schaltet man in Abbildung 14 den Objektstrahl ab und setzt den entwickelten Film ein, so wird (Siehe Abb. 15)

1. der Referenzstrahl natürlich hindurchgehen (Beugung 0. Ordnung).
2. der ehemalige Objektstrahl entstehen (Beugung 1. Ordnung).
3. ein weiterer, unnützer Strahl (konjugierter Objektstrahl) entstehen (Beugung -1. Ordnung).

Die Aufnahme eines Hologramms kann man praktisch verstehen, indem man sich die meist enorm komplizierte Objektwelle als aus lauter ebenen Wellen bestehend denkt⁴¹⁾. Im Film wird dann für jede Welle ein eigenes Streifenmuster gespeichert,

³⁹⁾Der Kontrast gibt an, wie gut das Interferenzmuster sichtbar ist. $K = 1$ bedeutet optimale Sichtbarkeit, bei $K \rightarrow 0$ verschwinden die Streifen völlig.

⁴⁰⁾„Kurzfassung“: Man zeigt, daß das Beugungsmuster bei einem Gitter mit periodischer Amplitudentransparenz genau die Fouriertransformierte der Amplitudentransparenz ist. Man erhält damit sofort, daß bei kosinusförmiger Amplitudentransparenz nur zwei Beugungsordnungen auftreten, während bei rechteckförmiger Amplitudentransparenz unendlich viele Ordnungen zu beobachten sein müssen.

⁴¹⁾Eigentlich ist die Vorstellung, daß man es mit Kugelwellen zu tun hat, besser: Jeder Punkt des Objektes sendet eine Kugelwelle entsprechender Intensität und Phase aus. In der Filmebene entstehen dann die entsprechenden Beugungsmuster. Das konjugierte Bild kommt bei dieser Vorstellung dadurch zustande, daß eine Fresnelsche Zonenplatte wie eine Linse wirkt, die zwei Brennpunkte hat.

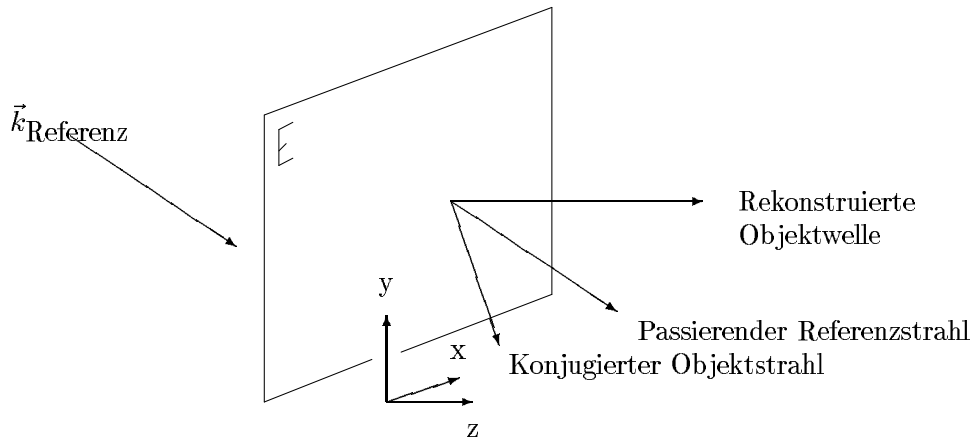
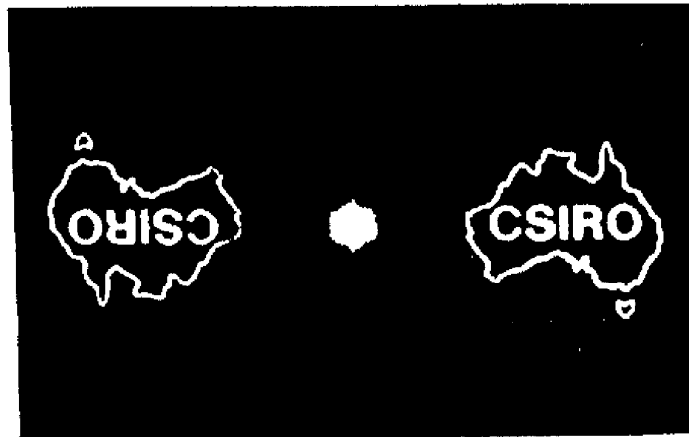


Abbildung 15: Situation bei der Hologrammrekonstruktion

das bei der Rekonstruktion dann als Beugungsgitter dient. Diese Vorstellung ist zulässig, weil das Superpositionsprinzip gilt, da die Maxwellgleichungen linear sind.

Bei der Rekonstruktion entsteht dann durch Beugung an den einzelnen Gittern wieder die ursprüngliche Objektwelle. Aus den konjugierten Strahlen entsteht zusätzlich noch ein konjugiertes Bild. Abbildung 16 zeigt ein einfaches Beispiel, das in vielen Lehrbüchern über Holografie zu finden ist. Zwischen den beiden Bildern ist der zur Rekonstruktion verwendete Strahl zu sehen, der ja auch zum Teil durch das Hologramm einfach hindurch geht.



Praktisch werden wir das konjugierte Bild allerdings nicht sehen können. ⁴²⁾

⁴²⁾Man muß sogenannte Fourierhologramme aufnehmen, um das konjugierte Bild zu sehen. Bei diesem Hologrammtyp wird die Fouriertransformierte des Objektes und der Referenzwelle aufgezeichnet. Aus einem leuchtenden Punkt wird dabei eine ebene Welle. Es liegt also genau der Fall vor, der oben behandelt wurde. Abbildung 17 zeigt eine Aufnahmeanordnung. Die Fouriertransformation wird dabei von einer Linse der Brennweite f vorgenommen. Das Objekt muß also *flach* sein, sonst funktioniert es nicht.

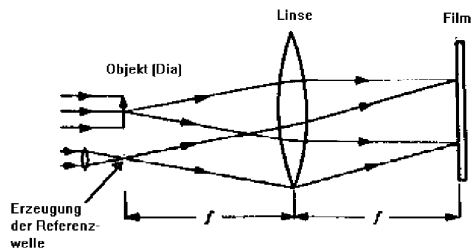


Abbildung 17: Aufnahme eines Fourierhologramms

4.2 Hologrammarten

Seit der Entdeckung der Holografie 1948 durch Dennis Gabor⁴³⁾



Abbildung 18: Dennis Gabor

wurden viele verschiedene Arten von Hologrammen und noch weit mehr Anwendungen der Holografie in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben. Im folgenden sei ein kleiner Überblick über die wichtigsten Hologrammarten gegeben:

1. Man bezeichnet Hologramme als „dicke Hologramme“, wenn die Filmschicht verglichen mit der Wellenlänge dick ist. Die anderen heißen analog „dünne Hologramme“. Im Praktikum nehmen wir dicke⁴⁴⁾ Hologramme auf. Die „Dicke“ brauchen wir für Weißlichthologramme (siehe unten).
2. Wir sind bisher davon ausgegangen, daß der Film einfach durch seine Schwärzung wie ein Gitter wirkt. Der Film beeinflusst also nur die Amplitude der durchgehenden Welle. So ein Hologramm heißt „Amplitudenhologramm“.

⁴³⁾*1900 in Ungarn, †1979 in England, Nobelpreis 1971

⁴⁴⁾Richtig „dick“ sind sie eigentlich nicht. Richtig „dicke“ Hologramme sind wesentlich dicker, sogar im Millimeterbereich!

Diese Hologramme haben den Nachteil, daß sie relativ lichtschwache Beugungsordnungen haben. Der Beugungswirkungsgrad beträgt nur etwa sechs Prozent.

Durch spezielle Entwicklung (das Bleichen) kann man erreichen, daß der Film nicht die Amplitude, sondern die Phase der durchgehenden Lichtwelle beeinflusst. Entsprechend heißen die Hologramme dann „Phasenhologramme“. Der Beugungswirkungsgrad beträgt hier theoretisch 100 Prozent, die Bilder sind also wesentlich heller!

Im Praktikum werden wir ausschließlich Phasenhologramme herstellen.

3. Ein „Transmissionshologramm“ wird mit einem Laser beleuchtet und im Durchlicht betrachtet. Dies sind die hellsten und eindrucksvollsten Hologramme. Im Gegensatz dazu werden „Reflexionshologramme“, wie der Name sagt, wie ein Spiegel benutzt.
4. Richtig bekannt wurden die „Weißlicht-Reflexionshologramme“, als sie mit einem speziellen Druckverfahren in Massen hergestellt werden konnten. Meist meint man mit „Reflexionshologramm“ schon „Weißlicht-Reflexionshologramm“. Das besondere bei diesen Hologrammen -es handelt sich um dicke Hologramme- ist das, daß man keinen Laser zur Rekonstruktion braucht. Man nutzt wieder die Dicke⁴⁵⁾ der Emulsion aus, um Informationen über die Wellenlänge des Lichtes zu speichern. Das Hologramm „sucht“ sich also aus dem angebotenen Weißlicht selbst das Licht mit der richtigen Frequenz heraus.
5. Macht man z.B. mit einem Impulslaser kurz hintereinander zwei Aufnahmen von ein und demselben Objekt, ohne die Position des Filmes zu verändern, so werden, wenn sich das Objekt bewegt hat, Streifen sichtbar. Die Verschiebung kann man dann angeben, indem man einfach die Streifenzahl zählt. Damit ist es möglich, z.B. im KFZ-Bereich die Schwingungen von Kotflügeln oder Motorblöcken im Nanometerbereich zu beobachten und Verbesserungen vorzunehmen. Fast alle modernen Fahrzeuge verdanken ihren ruhigen Lauf dieser Technik. Man nennt dies „Interferometrie mit der Doppelbelichtungs-technik“.

Diese Technik wäre auch mit dem vorliegenden Versuch durchführbar, aber aus Zeitgründen⁴⁶⁾ müssen wir darauf verzichten.

6. Eine weitere Klasse von Weißlichthologrammen stellen die sogenannten „Regenbogenhologramme“ dar. Diese Hologramme werden als eine Kopie von einem Masterhologramm aufgenommen⁴⁷⁾.

Mittels eines horizontalen Spaltes deckt man das Masterhologramm teilweise ab. (Siehe Abbildung 19.) Man schränkt

damit die sichtbare Perspektive des Objektes auf einen schmalen horizontalen Streifen ein. Dadurch erreicht man dann bei der Rekonstruktion eine Farbselektion, wie es in Abbildung 20 zu sehen ist.

⁴⁵⁾Bei uns etwa 20λ .

⁴⁶⁾Es gibt einen F-Praktikumsversuch, bei dem eine solche Aufnahme angefertigt wird.

⁴⁷⁾Wir werden diesen Gedanken später noch einmal aufgreifen. Stichwort: „Bildebenenhologramm“.

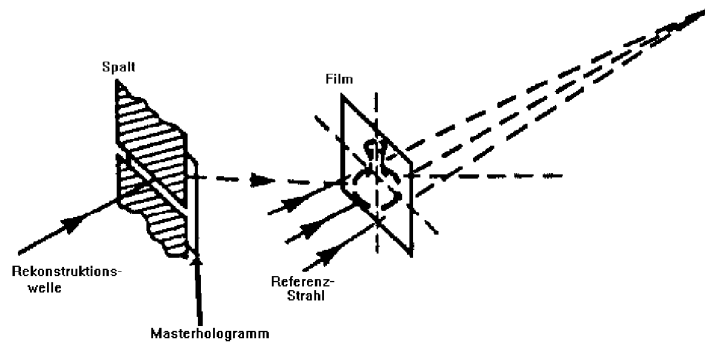


Abbildung 19: Aufnahme eines Regenbogenhologramms

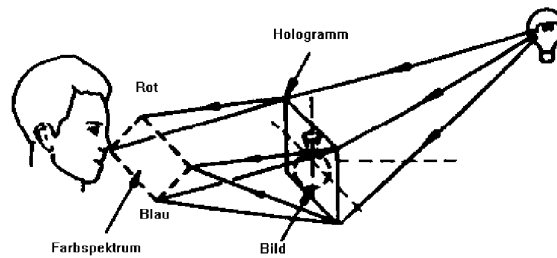


Abbildung 20: Rekonstruktion eines Regenbogenhologramms

Je nach dem Winkel, in dem man das Hologramm zum Licht hält, erscheint das Bild in einer anderen Farbe. Daher kommt der Name „Regenbogenhologramm“.

Zur Herstellung derartiger Hologramme braucht man entweder einen stärkeren Laser oder eine Zylinderlinse (wegen des beim Kopieren verwendeten Spaltes). Da beides nicht vorhanden ist, wird dieser Hologrammtyp im Praktikum nicht behandelt.

5 Die Modenblende

5.1 Wozu?

In der Holografie kommen meist aufgeweitete Laserstrahlen zur Anwendung. Erzeugt man diese mit einer einfachen Konvexlinse, so erhält man keinen gleichmäßigen Lichtfleck sondern einen häßlichen „ausgefransten“ und mit wilden Mustern übersäten Klecks⁴⁸⁾.

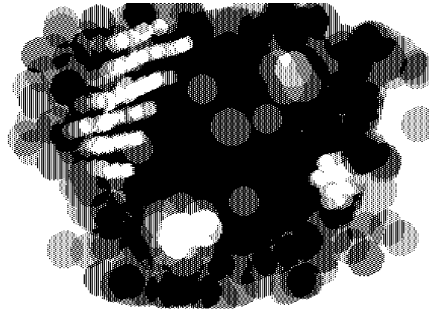


Abbildung 21: Mit Konvexlinse aufgeweiteter Strahl

Die Ursachen dafür sind

1. u.U. mangelhafte Linsen.
2. jede Art von Staub und Schmutz auf der Linse oder im Strahlengang.

In der Praxis verwendet man den in Abbildung 22 gezeigten Aufbau um diesem Effekt Herr zu werden. Man nennt so etwas „Modenblende“, „Raumfilter“ oder „Pinhole“.

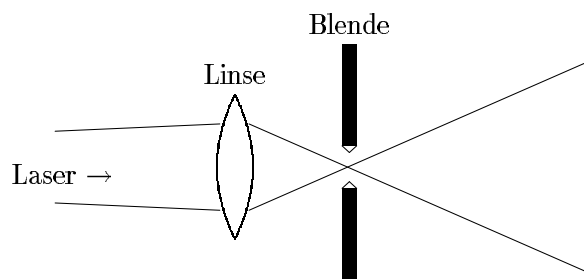


Abbildung 22: Die Modenblende

Der Witz dieser Anordnung besteht darin, daß der fokussierte Laserstrahl an dem Punkt, wo die Strahltaillie -die Stelle des Strahles mit dem kleinsten Durchmesser mit etwa $15\mu\text{m}$ ist, durch eine etwas größere Lochblende⁴⁹⁾ geschickt wird. Außerdem wird meist statt einer einfachen Linse ein ganzes Linsensystem verwendet.

⁴⁸⁾Sie können dies im Praktikum jederzeit ausprobieren. Linsen sind ausreichend vorhanden!

⁴⁹⁾Im Praktikum $20\mu\text{m}$.

Damit erreicht man kürzere Brennweiten und somit auch eine stärkere Aufweitung. Derartige Linsensysteme sind in jedem Mikroskop zu finden und werden deshalb auch in der Holografie gerne eingesetzt.

Physikalisch passiert im Pinhole folgendes:

Schmutz z.B. auf der Linse führt zu einer Beugung des die Linse passierenden Lichtes. Dieses Licht wird von der Linse nicht mehr in den Brennpunkt fokussiert, sondern läuft außerhalb des Brennpunktes vorbei und interferiert dann mit dem Licht, das aus dem Brennpunkt kommt. Dadurch entstehen die „wirren“ Muster. Unsere Lochblende fängt dieses Licht auf und verhindert somit, daß es Schaden in Form von Interferenzmustern anrichtet.

Aus den oben angegebenen Abmessungen wird klar, daß das Einstellen einer Modenblende nicht ganz einfach ist. Deshalb sei folgende Anleitung zur Hilfe gegeben:

5.2 Einstellen der Modenblende

Ziel der Einstellprozedur ist es, die Lochblende in drei Raumrichtungen, jeweils auf einige Mikrometer genau, so einzustellen, daß die Strahltaillie genau im Loch liegt. Gehen Sie wie folgt vor:

1. Sehen Sie sich zunächst an, wie die einzelnen Stellschrauben auf die Lochblende und das Mikroskopobjektiv wirken. Bringen Sie das Objektiv auf *maximale Entfernung zur Lochblende*.

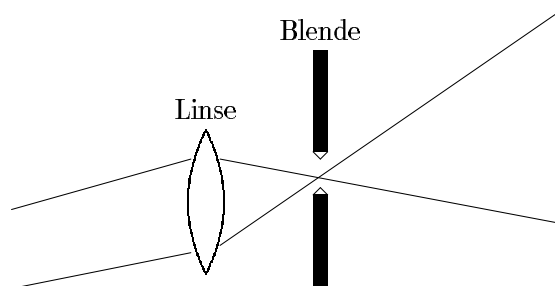


Abbildung 23: „Verdrehte“ Modenblende

2. Dunkeln Sie den Raum ab und plazieren Sie die Modenblende im Strahlengang. Sie müssen hinter der Modenblende auf einem weißen Karton das Beugungsmuster (Typ: „Beugung am Loch“) sehen können. Achten Sie darauf, daß die Modenblende nicht, wie in Abbildung 23 gezeigt, schief im Strahlengang steht. Das würde das Einstellen zwar nicht unmöglich machen, aber es erschwert die Prozedur ganz erheblich⁵⁰⁾.
3. Nun bewegen Sie das Objektiv stückweise näher an die Lochblende heran. Dabei müssen Sie die Lochblende ständig so nachstellen, daß Sie ein schön

⁵⁰⁾Sie müssen dann nämlich bei jeder Änderung des Abstandes von Objektiv und Blende die Position der Lochblende korrigieren!

symmetrisches, möglichst helles Beugungsmuster sehen. (In Abbildung 24 ist z.B. die horizontale Position der Lochblende nicht OK.)

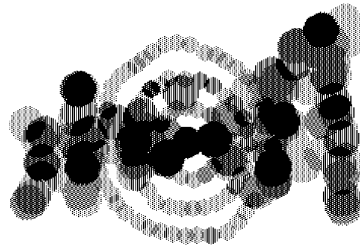


Abbildung 24: Falsche horizontale Position der Blende

Sehen Sie plötzlich gar nichts mehr, oder wissen Sie nicht, in welche Richtung Sie die Lochblende verschieben müssen, so bleibt nichts weiter übrig, als das Mikroskopobjektiv wieder etwas vom Loch zu entfernen und es nochmals zu versuchen.

4. Allmählich wird der Fleck immer heller und man sieht immer weniger Ringe des Beugungsmusters (Siehe Abbildungen 25, 26 und 27: In diesen Abbildungen ist die horizontale und vertikale Ausrichtung der Blende optimal. Der Abstand Objektiv-Blende nähert sich zunehmend seinem Optimum.).

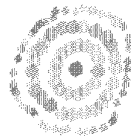


Abbildung 25: Einstellung der Modenblende 1

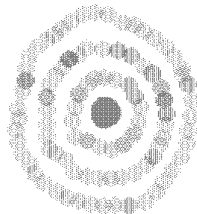


Abbildung 26: Einstellung der Modenblende 2

Wenn die Einstellung dann optimal ist (Strahltaile im Loch der Blende), hat man den gewünschten, gleichmäßigen Lichtfleck. (Siehe Abbildung 28.)

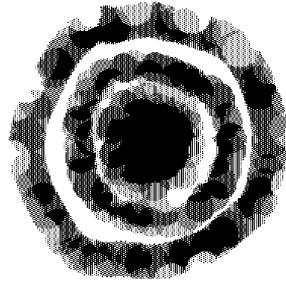


Abbildung 27: Einstellung der Modenblende 3

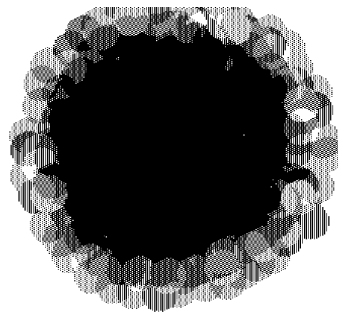


Abbildung 28: Strahl bei fertig eingestelltem Pinhole

5. Geht man mit dem Objektiv dann noch näher an die Blende heran, so tauchen die Ringe wieder auf.

Bei der Einstellprozedur gilt: *ÜBUNG MACHT DEN MEISTER !*

6 Das Filmmaterial

Eine Beschreibung des verwendeten *Agfa Holotest 8E75HD* Filmmaterials und der Entwicklungsprozedur.

6.1 Eigenschaften

In der Holografie sind verschiedene Aufzeichnungsmedien gebräuchlich. Wir wollen uns hier -wegen der einfachen Handhabung- nur auf Silber-Halogenid-Filme beschränken.

Zur Aufnahme von Hologrammen braucht man Filmmaterial mit einem sehr hohen Auflösungsvermögen, was einer sehr feinen Körnung entspricht. Bei dem im Praktikum verwendeten 8E75HD-Film beträgt das Auflösungsvermögen mehr als $5000 \frac{\text{Linien}}{\text{mm}}$ ⁵¹⁾. Normales Filmmaterial wäre mit $1000 \frac{\text{Linien}}{\text{mm}}$ schon total überfordert und ist deshalb für Holografie nicht verwendbar.

Der 8E75HD-Film hat, wie Abbildung 29 zeigt, die maximale Empfindlichkeit bei rotem Licht wie es unser HeNe-Laser erzeugt. Für andere Wellenlängen gibt es entsprechendes Material: z.B. Holotest 10E75 für blaues oder grünes Licht

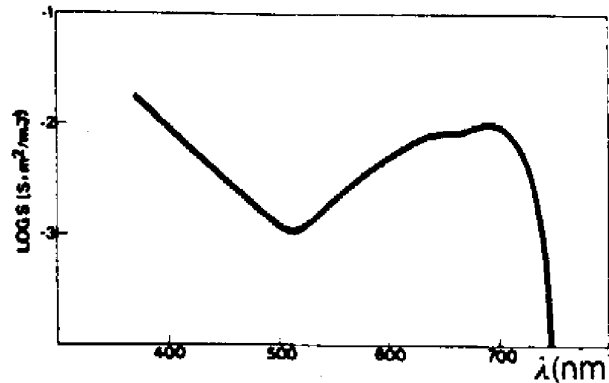


Abbildung 29: Spektrale Empfindlichkeit von 8E75

Gegenüber grünem Licht ist der 8E75-Film unempfindlich, so daß beim Arbeiten mit dem Film eine grüne Beleuchtung verwendet werden kann. Da die Lampen aber meist auch noch einen gewissen Rotanteil haben, ist es ratsam bei längeren Wartezeiten, z.B. bis sich der Aufbau beruhigt hat, auch die grüne Beleuchtung abzustellen.

Zur Charakterisierung eines bestimmten Filmmaterials verwendet man die Schwärzungskurve (→ Abbildung 30). Die Schwärzungskurve gibt an, wie stark der Film geschwärzt ist, nachdem er einer gewissen Bestrahlung ausgesetzt und entwickelt wurde. Die Filmschwärzung wird dabei entweder als optische Dichte⁵²⁾ D (wie in Abbildung 30) oder als Amplitudentransparenz angegeben. Während der Fotograf

⁵¹⁾Die Korngröße beträgt etwa 90nm .

⁵²⁾Die optische Dichte ist definiert als $D = -\ln(T)$ wobei T die Intensitätstransparenz ist. T wird bestimmt, indem man z.B. mit einer gewissen Intensität I_1 auf den Film einstrahlt und die durchgelassene Intensität I_2 mißt. Es gilt dann $T = \frac{I_2}{I_1}$.

die optische Dichte bevorzugt, ist in der Holografie die Amplitudentransparenz wichtiger. (Mit ihr kann man berechnen, wie das Licht gebeugt wird.)

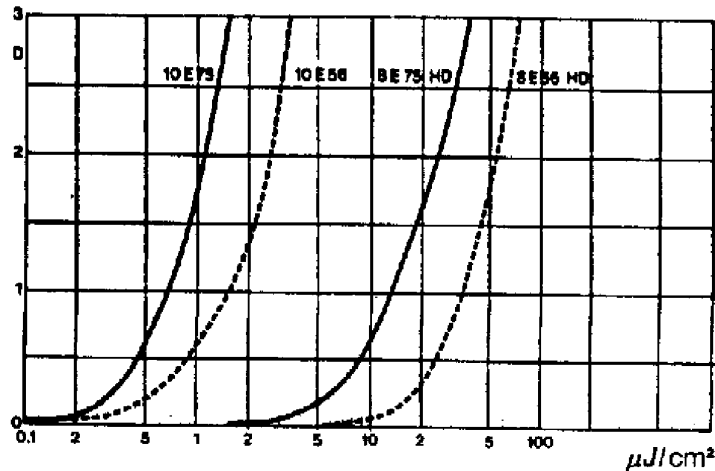


Abbildung 30: Schwärzungskurven

Wichtig ist die Schwärzungskurve z.B. zur *Bestimmung der Belichtungszeit*. Im Praktikum wollen wir mit etwa $25 \frac{\mu J}{cm^2}$ arbeiten!

Es wird Ihnen häufig begegnen, daß Sie herausfinden müssen, auf welcher Seite des Filmes nun die lichtempfindliche Schicht (Emulsion) ist. Der Film wird in ca. 8*10cm großen Stücken geliefert. Dabei hat der Film an einer Ecke eine Markierung. Liegt diese rechts oben, so ist die Emulsion auch oben!

Nun verwenden wir im Praktikum $\frac{1}{4}$ -Film-Stücke, und die ursprüngliche Markierung wird meist nicht zur Verfügung stehen. Da gibt es drei Möglichkeiten:

1. Sie ermitteln die Schichtseite selbst: Mit einem feuchten Finger fühlt sich die Schichtseite „klebrig“ an.
2. Sie schneiden den Film selbst zu und bringen dabei eine entsprechende Markierung, z.B. durch Abschneiden einer Ecke, an.
3. Sie bitten den Betreuer, den Film entsprechend zuzuschneiden.

6.2 Allgemeine Hinweise zum Entwickeln

1. Alle verwendeten Chemikalien sind nicht gerade gesund, also
 - (a) vermeiden Sie möglichst jeden Kontakt mit Haut und vor allem Augen!
 - (b) versuchen Sie möglichst wenig davon in den Abfluss gelangen zu lassen.
2. Spülen Sie jeden benutzten Gegenstand (Schalen, Trichter, Meßbecher,...) gleich nach der Benutzung sauber mit Wasser aus. (z.B. bekommt Entwickler im Bleichbad Ihrem Hologramm und dem Bleichbad nicht besonders!)

3. Richten Sie Dinge, die Sie benötigen wie Meßbecher, Schalen, die richtigen Entwicklerflaschen etc. schon *VOR* dem Umschalten auf grünes Licht her!
4. Sollten Sie (was sich manchmal nicht vermeiden läßt) „gesappert“ haben, so entfernen Sie Ihr Mißgeschick möglichst umgehend.

6.3 Entwickeln von Transmissionshologrammen

Zum Entwickeln eines Transmissionshologrammes gehen Sie wie folgt vor:

1. Transportieren Sie das belichtete Hologramm lichtdicht verpackt in der kleinen Pappschachtel in die Dunkelkammer. Kontrollieren Sie, ob die Vorhänge wirklich dicht sind, und schalten Sie das grüne Licht ein und die Neon Beleuchtung aus.
2. Bereiten Sie die weiße, ganz kleine Wanne für den $\frac{1}{4}$ -Film mit dem „G5P“-Entwickler vor. Nicht nur der Film, auch der *Entwickler ist lichtempfindlich!* Benutzen Sie nur soviel Entwickler wie unbedingt nötig.
3. Legen Sie den Film mit der *Schichtseite nach oben* in die Schale. *BEWEGEN* Sie die Schale ständig, um eine gleichmäßige Entwicklung zu gewährleisten. Beobachten Sie den Fortgang der Entwicklung. Nach etwa zwei bis fünf Minuten sollte der Film so dunkel sein, daß der Boden der Schale nicht mehr zu sehen ist, aber der Film gegen das Licht noch durchsichtig ist. Beenden Sie nun das Entwickeln und
4. legen Sie den Film zum Wässern in eine andere Schale.
5. Füllen Sie den Entwickler wieder zurück in die *richtige Flasche* !
6. Bereiten Sie in der weißen Schale das Bleichbad vor.

*Achtung:*Das Bleichbad enthält Schwefelsäure (H_2SO_4) und ist deshalb insbesondere für Ihre Augen gefährlich! Ferner steht das ebenfalls enthaltene Kaliumdichromat ($K_2Cr_2O_7$) im Verdacht, krebserregend zu sein!!!! Im Sinne Ihrer eigenen Gesundheit verwenden Sie die *SCHUTZBRILLE* und die *ZANGE* , wenn Sie mit dem Bleichbad hantieren!

7. War der Film drei Minuten im Wasser, so können Sie den Film ins Bleichbad legen, wobei die Schichtseite wieder oben sein muß. Der Film wird schnell klar werden. Ist der Film ganz klar, kann er noch 30 Sekunden im Bleichbad bleiben.
8. Wässern Sie den Film für *15 Minuten* . Währenddessen können Sie zuerst das Bleichbad in die Flasche zurückfüllen und dann die Neon-Beleuchtung wieder einschalten.
9. Füllen Sie eine Schale mit Netzmittel. Tauchen Sie den fertig gewässerten Film kurz ein und streifen Sie ihn mit dem Abstreifer ab. Dadurch werden Schlieren vermieden, die das Hologramm sonst unter Umständen entstellen könnten.
10. Mit dem Fön können Sie das Hologramm dann trocknen. Verwenden Sie aber *NICHT* die *HEIßE* Luft, denn das würde ein Schrumpfen der Emulsion bewirken und die Qualität des Hologramms vermindern.

6.4 Entwickeln von Reflexionshologrammen

Das Entwickeln von Reflexionshologrammen geschieht fast genau so, wie das Entwickeln von Transmissionshologrammen. Unterschiede:

1. Es wird nicht G5P-Entwickler, sondern eine Mischung verwendet. Eine Mischung deshalb, weil der sich ergebende Entwickler sehr lichtempfindlich ist und schnell unwirksam wird. Diese Entwicklermischung müssen Sie sich *VOR JEDEM ENTWICKELN NEU* herstellen. Dazu mischen Sie (bei grünem Licht) *EIN TEIL* Pyrogalllösung zu *ZWEI TEILEN* Natriumcarbonatlösung.

Stellen Sie jeweils nur so viel Entwickler her, wie Sie brauchen. Für die $\frac{1}{4}$ -Film-Stücke in der kleinen Schale reichen z.B. 30ml Pyrogallol zu 60ml Natriumcarbonat.

Den benutzten Entwickler schütten Sie in den Kanister mit der Aufschrift „Abfall Entwickler“, der unter dem Tisch steht.

2. Das Hologramm wird schneller dunkel und das ist auch beabsichtigt. Ein gutes Reflexionshologramm hat nach *ZWEI MINUTEN* im Entwickler eine Schwärzung von 70 Prozent, entsprechend einer optischen Dichte von $D = -\ln(0.3) = 1.2$ oder auch dunkler! Damit ist ein Reflexionshologramm wesentlich dunkler, wenn es aus dem Entwickler kommt, als ein Transmissionshologramm.
3. Beim Trocknen haben Sie die Möglichkeit durch Verwendung von warmer Luft (Fön: roter Knopf) einerseits die Trockenzeit zu verkürzen und andererseits eine Schrumpfung der Emulsion herbeizuführen. Die Strukturen des entstehenden Hologramms sind dann auch etwas geschrumpft, was dazu führt, daß das Objekt bei der Rekonstruktion mit weißem Licht nicht rot-orange sondern etwas ins blaue verschoben erscheint.

6.5 Bemerkung

Die oben beschriebenen Entwicklungsprozeduren sind nur die ganz einfachen Standardrezepte. In Fachkreisen werden beliebig komplizierte ⁵³⁾ „Rezepte“ oft wie Staatsgeheimnisse gehütet. Wer einige weitere Standardrezepte kennenlernen will, dem sei [5] empfohlen. Die Ergebnisse lohnen aber oft der Mühe einer aufwendigeren Entwicklungsprozedur!

⁵³⁾Oft bis zu 15 Entwicklungsschritte mit sehr ausgefallenen Chemikalien.

7 Versuchsdurchführung

Achtung: Zu allererst, wenn Sie den Praktikumsraum betreten haben, schalten Sie bitte den Laser ein. Dieser benötigt eine gewisse⁵⁴⁾ Zeit zum Aufwärmen bis er

1. die volle Leistung bringt.
2. nicht mehr driftet (thermische Ausdehnung des Resonators im Laser).

Führen Sie dann folgende Versuchsteile durch:

1. Michelsoninterferometer
2. Reflexionshologramm
3. Erweiterter Aufbau für Reflexionshologramme⁵⁵⁾
4. Einfacher Aufbau für Transmissionshologramme

In Absprache mit dem Betreuer können Sie je nach verfügbarer Zeit dann aus folgenden Aufbauten auswählen⁵⁶⁾:

5. Fortgeschrittenenaufbau für Transmissionshologramme
6. Bildebenenhologramme

Sehr zu empfehlen sind auch noch die „Spielchen“ zum jeweiligen Hologramm. Insbesondere beim Transmissionshologramm sind sie sozusagen das „Salz in der Suppe“.

Abschließend sollten Sie die Arbeitsplätze (Dunkelkammer und Experimentiertisch) wieder sorgfältig aufräumen und alles abschalten.

Fassen Sie optische Komponenten immer nur am Halter an!

Fingerabdrücke auf Linsen oder Spiegeln beeinträchtigen die Qualität der entstehenden Hologramme ganz erheblich!

⁵⁴⁾Etwa 30 Minuten.

⁵⁵⁾Sie sollen 2 Reflexionshologramme aufnehmen, damit jeder von Ihnen eines als kleines „Andenken“ hat.

⁵⁶⁾Sie sollten sich auf jeden Fall die Hologramme, die Sie nicht selbst machen konnten von Ihrem Betreuer zeigen lassen.

8 Michelsoninterferometer

Mit einem Michelsoninterferometer soll die Stabilität des Tisches ermittelt werden. Sie sollen ein Gefühl für die optischen Komponenten erhalten.

Bauen Sie ein Michelsoninterferometer, wie es Abbildung 31 zeigt, auf:

1. Plazieren Sie den Laser und sorgen Sie dafür, daß der Strahl in 115mm über der Arbeitsplatte verläuft.
2. Mit dem variablen Strahlteiler (VST) teilen Sie den Strahl in zwei gleich helle Strahlen auf.
3. „Werfen“ Sie die beiden Strahlen mit Spiegeln S1 und S2 in sich zurück. Was ist bezüglich der Länge der beiden Arme zu beachten? Warum?
4. Beobachten Sie die beiden Leuchtpunkte auf einem Schirm (eine weiße Pappe im Plattenhalter ist bestens geeignet).
5. Mit einer Konvexlinse können Sie den/die⁵⁷⁾ Strahlen aufweiten.

Spielen Sie mit dem Interferometer herum und machen Sie sich Gedanken über folgende Dinge⁵⁸⁾:

1. Wie kommt das Interferenzmuster überhaupt zustande?

⁵⁷⁾Je nachdem ob Sie die Linse zwischen Laser und VST oder zwischen VST und Schirm aufstellen.

⁵⁸⁾Irgend etwas muß der Betreuer im Kolloquium Sie ja fragen...

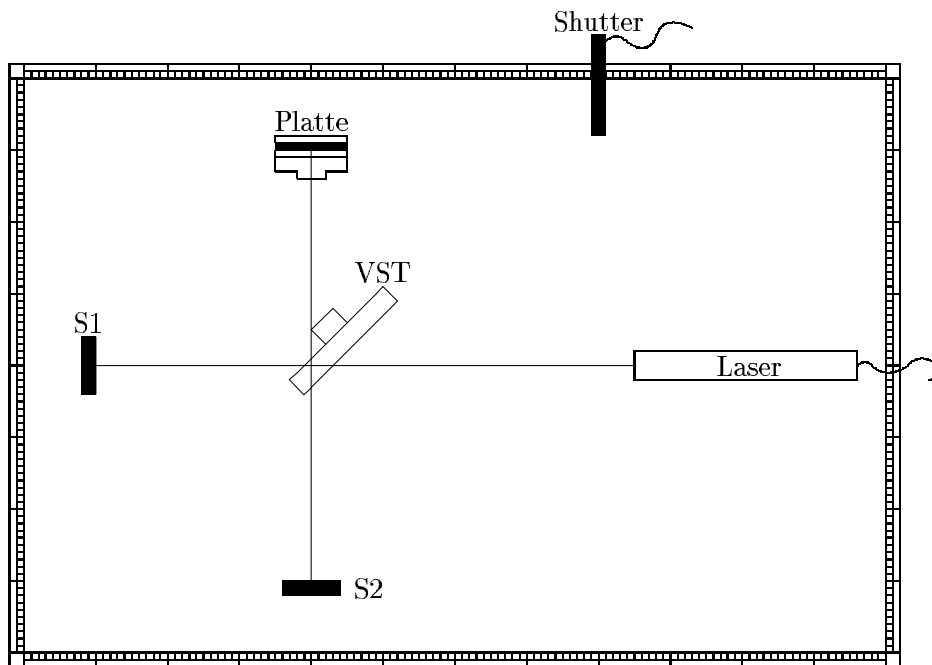


Abbildung 31: Michelsoninterferometer

2. Welche Auswirkung hat die Position der Aufweitungslinse auf das Interferenzmuster (Ringe/Streifen)?
3. Sind die „Streifen“ wirklich ganz gerade? Was sind die Streifen mathematisch gesehen?
4. Welche Rolle spielt die Polarisierung des Laserlichtes?
5. Was passiert, wenn die „Arme“ des Interferometers stark unterschiedlich lang sind??
6. Unter Umständen sehen Sie, daß das Interferenzmuster in gewissen Intervallen verschwindet und dann wieder auftaucht. Woher kommt das???
7. Beobachten Sie den Einfluß der Einstellung des Strahlteilers auf das Interferenzmuster. Erklärung?
8. Was sehen wir, wenn die beiden Spiegel exakt gleich weit vom Strahlteiler entfernt sind? ⁵⁹⁾

⁵⁹⁾Maximum oder Minimum der Intensität?

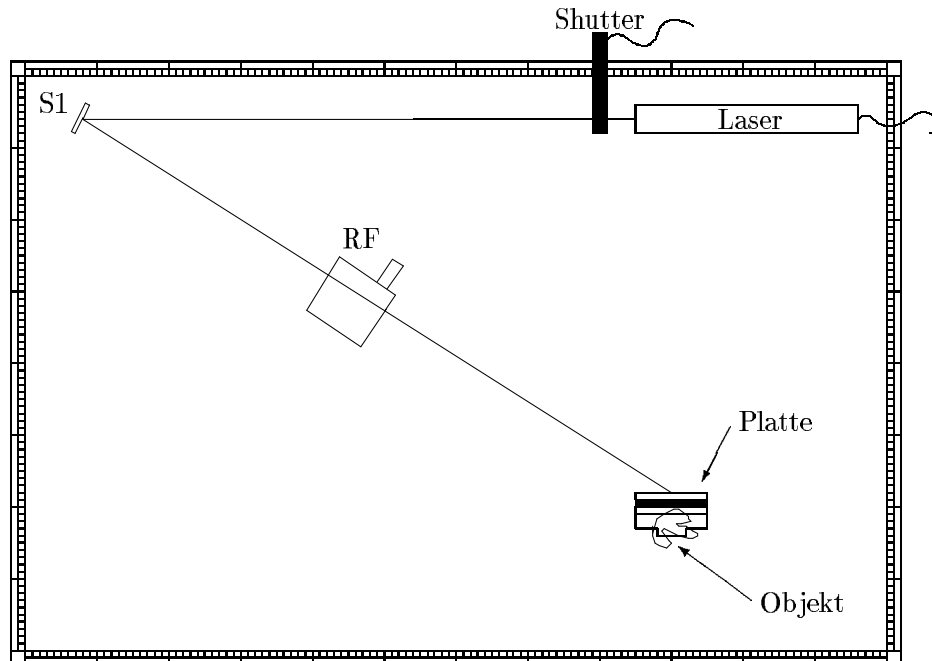


Abbildung 32: Aufbau für Reflexionshologramme

9 Reflexionshologramme

9.1 Ein Grundaufbau

Ein grundlegender, ganz einfacher Aufbau zur Aufnahme von Weißlicht-Reflexionshologrammen auf $\frac{1}{4}$ -Filmstücken. Geeignet sind nur sehr helle und möglichst flache Objekte.

Zur Aufnahme eines Weißlicht-Reflexionshologramms verwenden wir den in Abbildung 32 gezeigten, ganz einfachen Aufbau:

1. Plazieren Sie den Spiegel S1 und den mit Pappe bestückten Plattenhalter auf dem Tisch. Justieren Sie S1 so, daß die Mitte der Pappe getroffen wird.
2. Ersetzen Sie die Pappe durch eine Glasscheibe und stellen Sie den Plattenhalter im Brewster-Winkel auf. (Ohne ihn zu verschieben!)

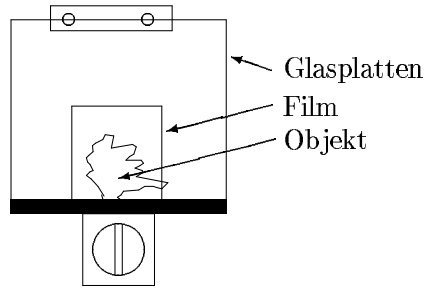


Abbildung 33: Filmposition bei Reflexionshologrammen

3. Setzen Sie die Modenblende RF ein. Den optimalen Abstand zum Plattenhalter ermitteln Sie durch Probieren: Es muß ein $\frac{1}{4}$ -Film, der ganz unten im Plattenhalter eingespannt ist, möglichst hell und gleichmäßig ausgeleuchtet werden. (→ Abbildung 33)
4. Verwenden Sie die Blenden, um Streulicht vom Plattenhalter fernzuhalten und die Kanten abzuschatten. Es ergibt sich so der in Abb. 34 gezeigte Aufbau.
5. Timer auf Automatik, drei Sekunden Belichtungszeit und bei grünem Licht den Film einlegen: Schichtseite zum Objekt.

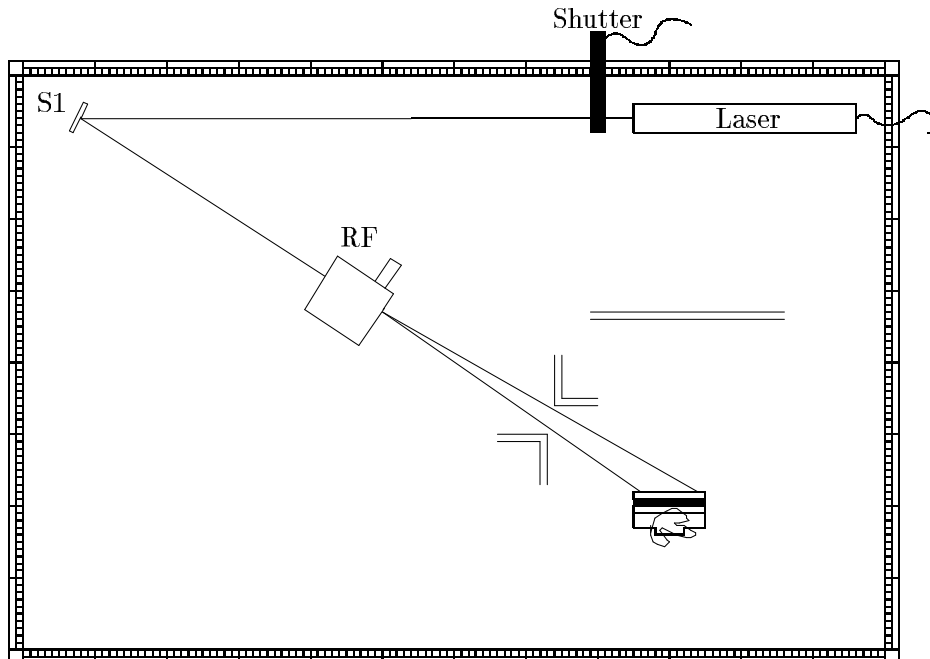


Abbildung 34: Blendenposition in Abbildung 32

6. Stellen Sie das Objekt direkt hinter der Glasplatte auf den Plattenhalter und lehnen es an die Glasplatte.
7. Bei absoluter Dunkelheit *MINDESTES 2 MINUTEN* warten - belichten.
8. Entwickeln.
9. Betrachten Sie Ihr Hologramm im Sonnenlicht oder im Licht des Projektors.

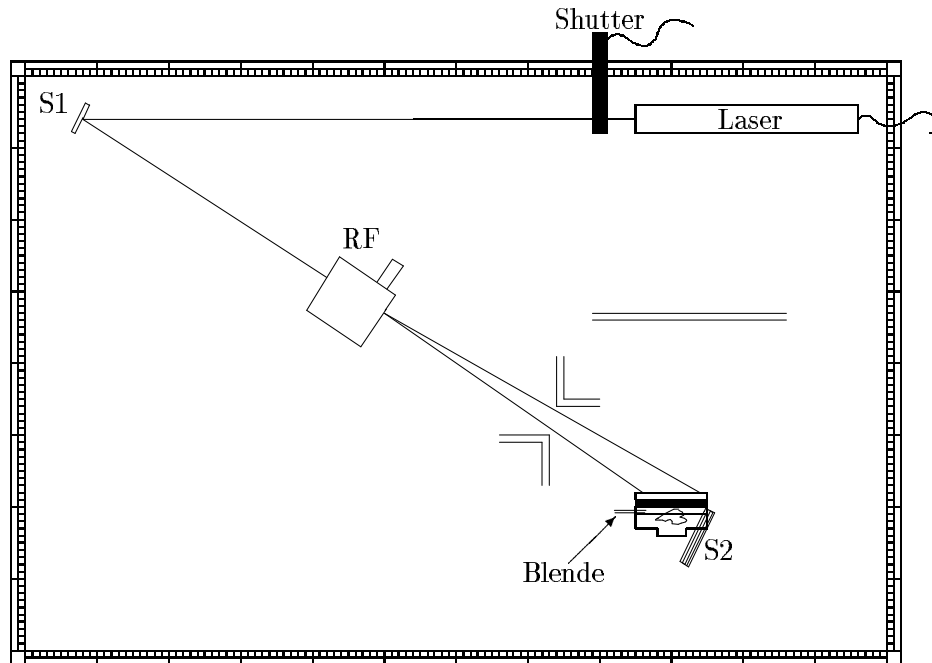


Abbildung 35: Erweiterung des Aufbaus für Reflexionshologramme

9.2 Erweiterung des Grundaufbaus

Eine einfache aber wirkungsvolle Erweiterung des Grundaufbaus.

Wenn Sie ihr Hologramm aus 9.1 betrachten, wird Ihnen auffallen, daß das Objekt nur recht ungenügend ausgeleuchtet war. Das ist ja auch verständlich, denn das Objekt wurde ja im Brewster-Winkel und somit sehr stark von der Seite beleuchtet. Eine wesentliche Verbesserung bringt das Einfügen des Spiegels S2, wie in Abbildung 35 gezeigt. Das Licht, welches bisher „nur“ als Referenzstrahl dient und ungenützt vor dem Objekt vorbeiging, wird damit umgelenkt und zur weiteren Objektbeleuchtung eingesetzt.

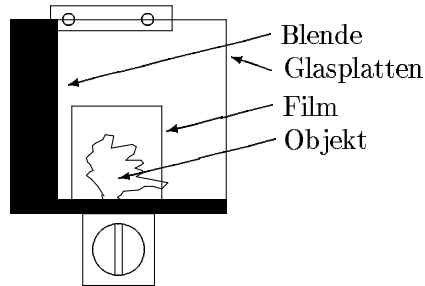


Abbildung 36: Filmposition beim erweiterten Aufbau

Bestücken Sie den Plattenhalter mit der Glasplatte und bauen Sie Ihr Objekt auf. Nun justieren Sie den Spiegel S2. Das ist recht trickreich, denn

1. das Objekt soll möglichst gut ausgeleuchtet sein.
2. *KEINESFALLS* darf gespiegeltes Licht direkt auf den Film fallen!
3. die, vom Objekt aus gesehen, linke Glaskante darf nicht beleuchtet werden.

Dieses Einstellen bedarf einiger Zeit des Herumprobierens - nicht verzweifeln!

Zur Abschattung der linken Glaskante kann eine Blende aus schwarzem Sandpapier, wie in Abbildung 36 gezeigt, verwendet werden.

Das Einlegen des Filmes ist jetzt wesentlich schwieriger, da der Zugang zum Plattenhalter erheblich behindert ist. Auch sollte die Objekt-Position natürlich möglichst wenig verändert werden, damit die gute Ausleuchtung erhalten bleibt.

Steht das Objekt stabil auf dem Plattenhalter, so ist es am einfachsten, das Platten- und Filmsandwich von vorne einzusetzen, ohne das Objekt zu entfernen.

Das weitere Vorgehen ist wie in 9.1.

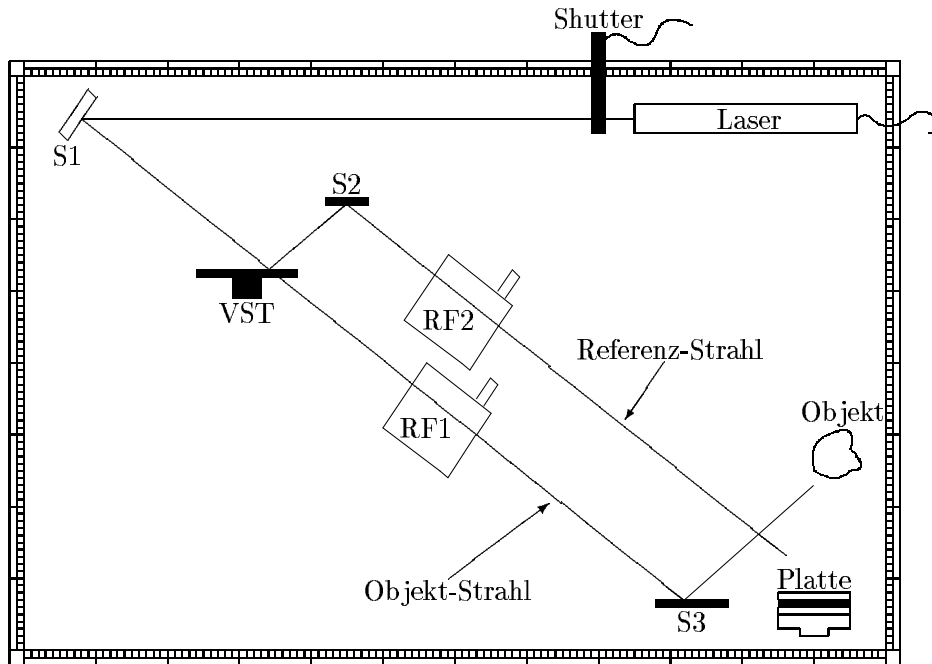


Abbildung 37: Einfacher Aufbau für Transmissionshologramme

10 Transmissionshologramme

10.1 Ein einfacher Aufbau

Ein Aufbau für Anfänger zur Aufnahme von Transmissionshologrammen auf $\frac{1}{4}$ -Filmstücken⁶⁰⁾ bei relativ konvexen Objekten (sonst Schattenbildung).

Wir wollen nun ein Transmissionshologramm aufnehmen, dazu verwenden wir den in Abb. 37 gezeigten Aufbau. Gehen Sie beim Aufbauen zum Beispiel⁶¹⁾ wie folgt vor:

1. Justieren Sie den Laser so, daß der Strahl parallel zum Tisch in 115mm über der Metalloberfläche verläuft. Sie sollten auch später immer wieder kontrollieren, ob diese Höhe auch nach Spiegeln, Strahlteilern etc. noch stimmt. Macht Ihr Strahl nämlich eine Berg- und Talfahrt, so kommen Sie später beim Einsetzen der Modenblenden in übelste Probleme!
2. Plazieren Sie den Photoplattenhalter mit eingelegter weißer Pappe wie in Abbildung 37 angegeben. Gleich neben dem Plattenhalter stellen Sie dann den großen Spiegel mit der abenteuerlichen Konstruktion aus Stativstangen als S3 auf. Aber *Achtung*: Die Gewichtsverteilung dieses Spiegels ist alles andere als gleichmäßig. Greifen Sie also fest zu, bevor Sie den Magnetfuß lösen.
3. Stellen Sie nun S1 auf den Tisch und „schießen“ Sie durch geeignetes Verstellen von S1 und S3 direkt in die Mitte von S3 (*Höhenkontrolle!*).

⁶⁰⁾Für große Filme die Modenblenden weiter weg von Film und Objekt sowie länger Belichten!

⁶¹⁾Es geht sicher auch anders, vielleicht schneller oder angenehmer...(Experimentieren erlaubt!)

4. Plazieren Sie nun den variablen Strahlteiler (VST) wie angegeben. Stellen Sie den VST so ein, daß er maximal reflektiert. Jetzt ist es einfach S2 aufzustellen.
5. Verstellen Sie S2 so, daß der Referenz-Strahl mitten auf die Dummy-Pappe im Plattenhalter trifft. (*Höhenkontrolle!*)
Beachte: Ein Verstellen von S1 beeinflusst jetzt sowohl den Referenz- als auch den Objektstrahl!
6. Ersetzen Sie nun die Pappe im Plattenhalter durch eine Glasscheibe und drehen Sie den Plattenhalter so, daß der gespiegelte Referenz-Strahl minimale Helligkeit hat, das Licht also unter dem Brewster-Winkel einfällt.
7. Plazieren Sie nun RF1, den ersten Raumfilter⁶²⁾, und stellen Sie ihn richtig ein, so daß er den Spiegel S3 schön ausleuchtet. Dabei ist es natürlich hilfreich, den VST wieder so einzustellen, daß er möglichst wenig Licht reflektiert.
8. Verfahren Sie ebenso mit RF2. Der Referenz-Strahl muß die gesamte Fläche einer Pappe im Plattenhalter schön ausleuchten.
9. Bauen Sie Ihr Objekt etwa 10-15cm vor dem Plattenhalter auf dem vorgesehenen Tisch auf und stellen Sie S3 -vermöge der Stangenkonstruktion- so ein, daß er Ihr Objekt möglichst hell und schattenfrei ausleuchtet. Der Blick von hinten durch eine Glasplatte im Plattenhalter zeigt Ihnen, was später auch auf dem Hologramm zu sehen sein wird!!
10. Plazieren Sie nun die Blenden aus schwarzem Sandpapier so, daß die Glasanten des Plattenhalters abgeschattet sind, und daß kein Streulicht z.B. von Spiegeln oder Raumfiltern auf die Platte fallen kann. Außerdem können Sie mit der großen schwarzen Wand für einen dunklen Hintergrund sorgen.
Nun sollte der Aufbau etwa wie in Abbildung 38 gezeigt aussehen.
11. Verdunkeln Sie nun den Raum total (auch die grüne Lampe) und stellen Sie nun den VST so ein, daß das Intensitätsverhältnis $\frac{\text{Objekt-Strahl}}{\text{Referenz-Strahl}} \approx \frac{1}{3}$ beträgt. Messen Sie dazu abwechselnd beide Intensitäten, indem Sie immer einen Strahlengang blockieren.
12. Stellen Sie die Belichtungszeit richtig ein: Für dunkle Objekte (Objekt-Intensität kleiner $100 \cdot 10^{-2} \frac{W}{m^2}$) belichten Sie 50s bei helleren Objekten kürzer. Mindestens jedoch 25s (bei z.B. $100 \cdot 10^{-1} \frac{W}{m^2}$) haben sich bestens bewährt⁶³⁾. Bringen Sie den Timer in die richtige Betriebsart. (Zu/Timer)
13. Laden Sie den Plattenhalter (Schichtseite zum Objekt!) wie an entsprechender Stelle beschrieben.

⁶²⁾Sie müssen mit RF1 beginnen, da u.U. die Strahl-Höhe mit S1 etwas zu korrigieren ist, was eine schon erfolgte Justierung von RF2 zerstören würde!

⁶³⁾Rechnen Sie nach wie groß die Belichtungszeit sein müßte, um den optimalen Wert von $25 \frac{\mu J}{cm^2}$ für die Bestrahlung zu erhalten!

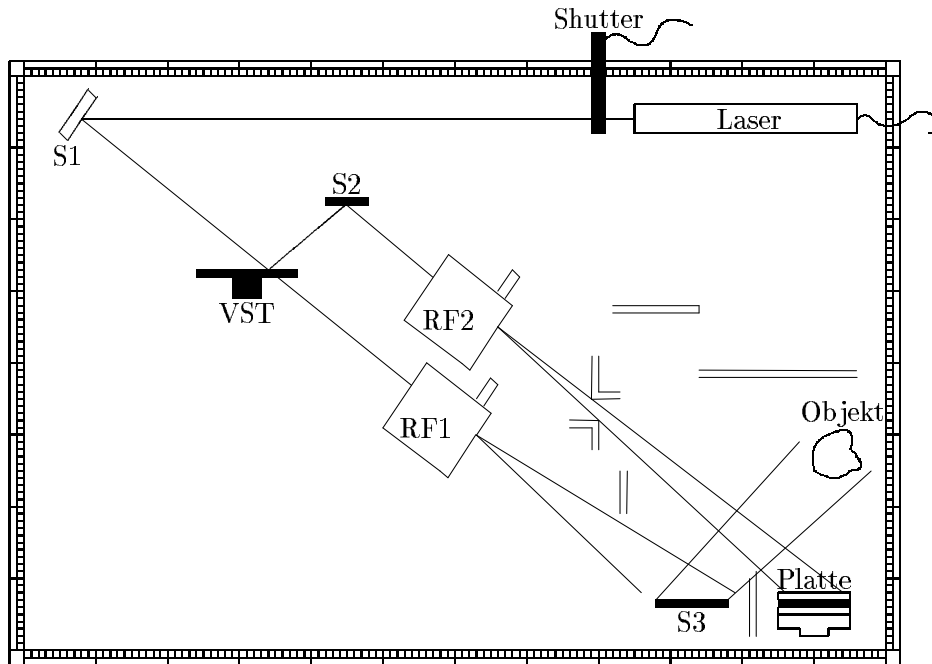


Abbildung 38: Position der Blenden in Abb. 37

14. Wenn alles fertig ist, schalten Sie das grüne Licht aus und *warten MINDESTENS 2 MINUTEN*⁶⁴⁾ bis sich alles beruhigt hat. Nun betätigen Sie den Start-Knopf. Erzeugen Sie während der Belichtung keine Erschütterungen (Laufen, Sprechen, ...)!
15. Entwickeln Sie den Film.
16. Spannen Sie den fertigen Film (in der richtigen Orientierung⁶⁵⁾) wieder in den Plattenhalter. Durch Verstellen des VST in der Nähe der Sprungstelle können Sie schlagartig zwischen Ihrem Hologramm (Referenzstrahl hell) und dem realen Bild (Objektstrahl hell) umschalten.
17. Ist Ihr Hologramm gelungen und haben Sie noch Zeit, so sei Ihnen das Kapitel „Spielchen“ noch sehr empfohlen.

⁶⁴⁾ Wenn man im Dunkeln untätig „rumsitzt“ ist das echt ätzend lang!

⁶⁵⁾ Es gibt derer vier!

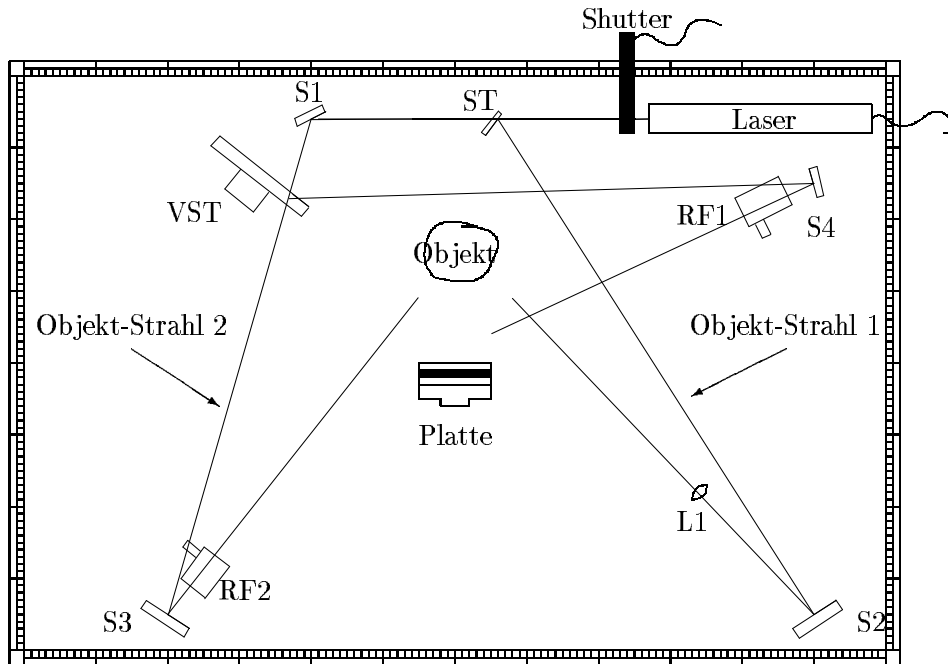


Abbildung 39: Fortgeschrittener Aufbau für Transmissionshologramme

10.2 Ein Aufbau für Fortgeschrittene

Ein Aufbau für Fortgeschrittene zur Aufnahme von Transmissionshologrammen auf $\frac{1}{4}$ -Filmstücken bei komplizierteren Objekten (Ausleuchten von Schatten mit weiterem Objektstrahl).

Erstellen Sie einen Aufbau wie in Abbildung 39 dargestellt⁶⁶⁾. Als Strahlteiler ST verwenden Sie einfach eine Glasplatte.

Achten Sie darauf, daß alle Lichtwege etwa gleich lang sind. Der Laufzeitunterschied von ST zu S1 wird dadurch ausgeglichen, daß S2 weiter von der Mitte entfernt steht als S3.

Um eine optimale Ausleuchtung des Filmes und des Objektes zu erhalten, sollten Sie die Raumfilter tatsächlich so nah wie möglich an die Spiegel S3 und S4 stellen. Der Rand bzw. die Mikrometerschraube der Modenblende sind so niedrig, daß es kein größeres Problem darstellt, wenn der auf den Spiegel einfallende Strahl sich mit dem Rand oder der Mikrometerschraube überlappt.

Mit dem Objekt-Strahl-1 können Sie Schattenstellen Ihres Objektes ausleuchten. Erwarten Sie aber keine Wunder, denn

1. es wird nur ein kleiner, fester Teil von vier Prozent des Lichtes mittels ST ausgelenkt. Der Objekt-Strahl-1 ist also recht dunkel.
2. zur Aufweitung vom ersten Objekt-Strahl kommt eine normale Linse zur Anwendung. Der entstehende Lichtfleck ist also reichlich „unsauber“.

⁶⁶⁾Als Fortgeschrittener brauchen Sie keine Step-by-Step-Beschreibung mehr???

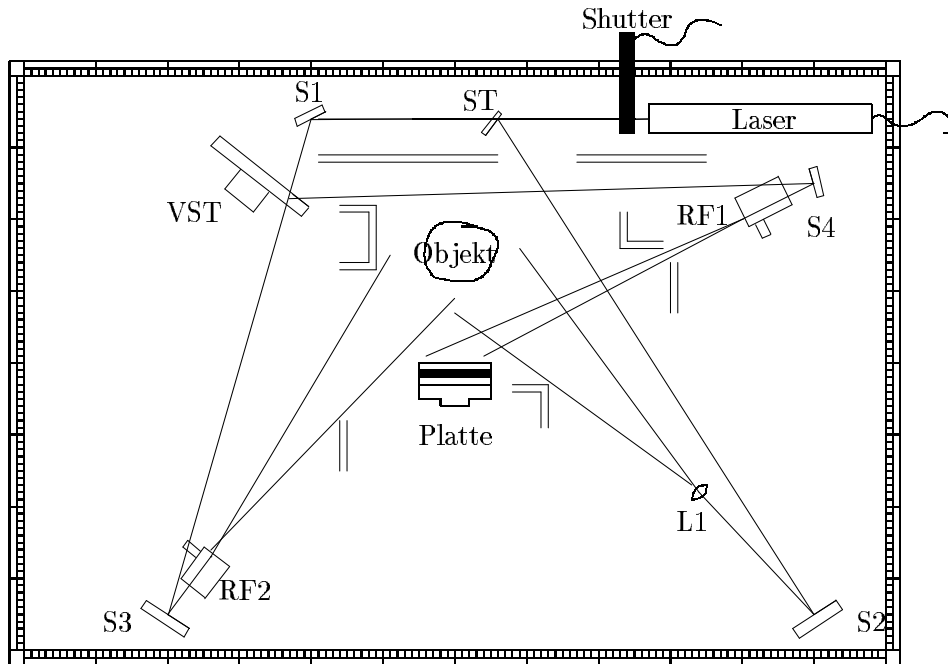


Abbildung 40: Blendenposition in Abb. 39

Sehr knifflig ist auch das Abschatten bei dieser Anordnung. Sie müssen alles an Blenden investieren, was vorhanden ist. Achten Sie darauf, daß Ihre Blenden nicht irgendwelche Lichtwege beeinflussen (z.B. den Referenz-Strahl von VST nach S4). Eine vollständige Abschattung wäre z.B. die in Abb. 40 gezeigte.

Bei dieser Anordnung werden Sie etwas länger belichten müssen, als bei der „Anfänger-Version“. Das Objekt-Licht wird durch die Beleuchtung von zwei Seiten schlechter ausgenutzt und es befinden sich mehr Spiegel im Strahlengang.

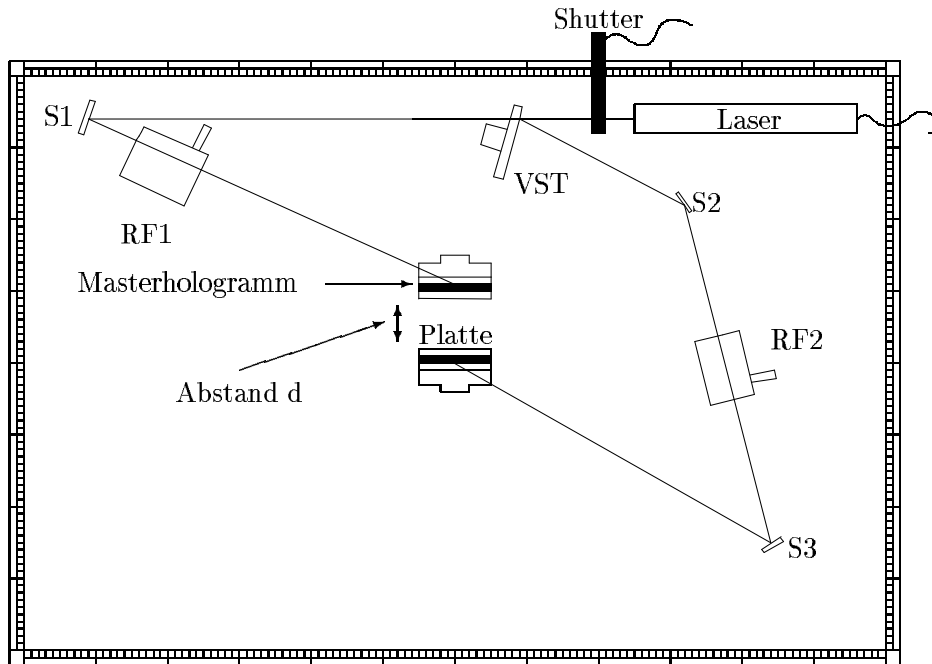


Abbildung 41: Aufbau für ein Bildebenehologramm

11 Bildebenen-Reflexionshologramm

Ein Aufbau, um von einem gegebenen Master-Transmissionshologramm ein Weißlicht-Reflexionshologramm als Kopie anzufertigen. Es entstehen sehr helle und plastische Hologramme auf $\frac{1}{4}$ -Filmstücken.

Beleuchtet man ein Transmissionshologramm bei der Rekonstruktion von der falschen Seite, so entsteht kein normales virtuelles Bild sondern ein reelles pseudoskopisches⁶⁷⁾, das man z.B. mit einem Schirm auffangen kann (siehe „Spielchen“). Nun kann man versuchen das reelle Objekt holografisch aufzunehmen. Zunächst könnte man annehmen, daß das nur von akademischem Interesse ist, aber dem ist ganz und gar nicht so:

Beim bisherigen Aufbau für Reflexionshologramme war das Objekt stets direkt hinter dem Film lokalisiert. Ist aber gar kein wirkliches Objekt vorhanden, so hindert uns nichts daran, den Film direkt durch das vom Masterhologramm⁶⁸⁾ erzeugte reelle Bild verlaufen zu lassen. Bei der Rekonstruktion des so erzeugten Hologramms scheint dann das Objekt im oder sogar vor dem Film zu stehen! Daher auch der Name „Bildebenenhologramm“.

Abbildung 41 zeigt einen entsprechenden Aufbau. Oben ist das als Kopiervorlage dienende Masterhologramm, welches Sie sich beim Betreuer geben lassen können. Kurzanleitung zum Aufbau:

1. Bauen Sie zuerst S1, RF1 und VST⁶⁹⁾ auf und rekonstruieren Sie zunächst das Masterhologramm. Wenden Sie dann das Masterhologramm, so daß es

⁶⁷⁾Siehe „Spielchen“ zu Transmissionshologrammen!

⁶⁸⁾Die Kopiervorlage wird oft „Masterhologramm“ genannt.

⁶⁹⁾Es ist zweckmäßig den VST gleich hineinzustellen. Wer nicht weiß warum, der sollte ihn weglassen. Der Lerneffekt ist dann größer...

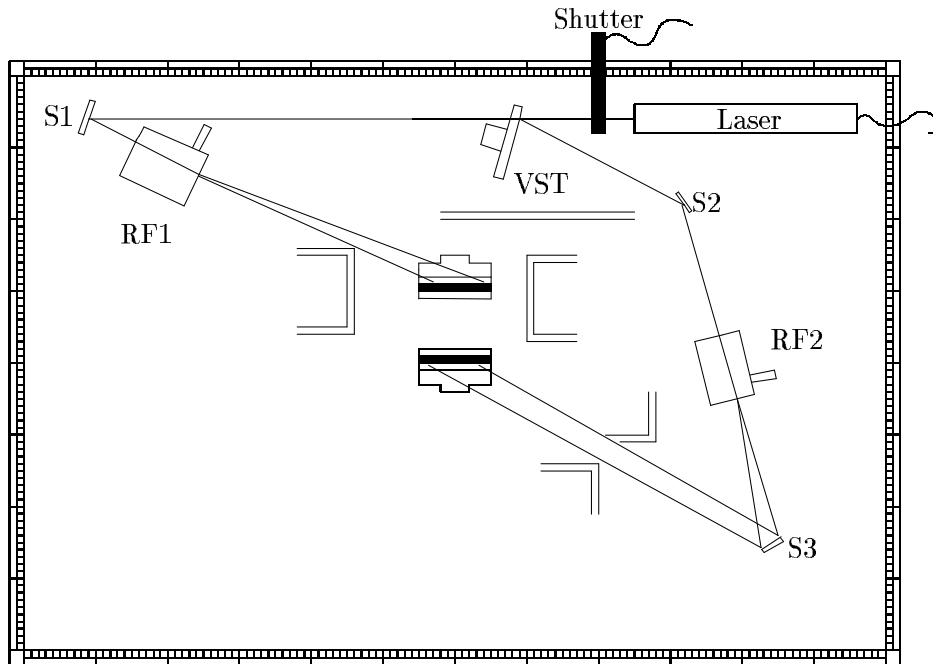


Abbildung 42: Blendenaufstellung in Abb. 41

von der Rückseite beleuchtet wird, und stellen Sie den Einfallswinkel so ein, daß das erzeugte reelle Bild (mit der Pappe beobachten) maximale Helligkeit hat.

2. Wählen Sie den Abstand d , wie es Ihnen gefällt⁷⁰⁾: Das reelle pseudoskopische Bild befindet sich etwa 80mm vor dem Masterhologramm.
3. Stellen Sie den zweiten Plattenhalter für unser Reflexionshologramm parallel zum Masterhologramm im Abstand d auf, so daß das reelle Bild in der Mitte des Plattenhalters ist. Mit S2, S3 und RF2 erzeugen Sie den Referenzstrahl für das Reflexionshologramm (Brewsterwinkel!).
4. Stellen Sie ein Intensitätsverhältnis Objekt zu Referenz von etwa eins zu drei ein.
5. Schatten Sie nun gründlich ab. Insbesondere darf der Rekonstruktions-Strahl *keinesfalls* unseren Film im unteren Plattenhalter treffen! Es ergibt sich jetzt der in Abb. 42 gezeigte Aufbau.
6. Belichten Sie etwa fünf Sekunden.

⁷⁰⁾Folgende Überlegung: Wir nehmen ja ein Pseudoskopisches Bild auf. Beim Betrachten wollen wir aber ein orthoskopisches Bild sehen. Wir werden das fertige Reflexionshologramm also von der „falschen“ Seite anschauen. Also muß unser reelles pseudoskopisches Objekt bei der Aufnahme *hinter* dem Film sein, damit es nachher als orthoskopisches vor dem Film erscheint. Langer Rede kurzer Sinn:

$$\text{Abstand klein} \rightarrow \text{Objekt hinter dem Film} \quad (28)$$

$$\text{Abstand } d \text{ groß} \rightarrow \text{Objekt vor dem Film} \quad (29)$$

Abstände von $60\text{mm} < d < 90\text{mm}$ sind erprobt.

Auch hier sollten Sie, wenn Sie Lust und vor allem Zeit haben, noch das Kapitel „Spielchen“ aufschlagen...

12 „Spielchen“ mit den aufgenommenen Hologrammen

12.1 Reflexionshologramm

Bei der Rekonstruktion des Reflexionshologramms fällt auf, daß man nur bei der Betrachtung von der richtigen Seite⁷¹⁾ ein ordentliches Bild sieht. Betrachtet man das Hologramm von der anderen Seite, so sieht man auch ein Bild, aber das verhält sich seltsam:

1. Die Perspektive ist „verkehrt“: Bewegt man den Kopf nach rechts, so verändert sich das Bild so, als hätte man den Kopf nach links bewegt. Ein derartiges Verhalten nennt man „pseudoskopisch“ im Gegensatz zum gewohnten „orthoskopischen“ Verhalten.
2. Das Objekt scheint vor dem Film zu stehen.

Insgesamt sieht es so aus, als würde man in einen Abdruck, eine Hohlform des Objektes hineinschauen.

12.2 Transmissionshologramm

12.2.1 Pseudoskopie

Rekonstruieren Sie zunächst Ihr Transmissionshologramm. Drehen Sie es dann um die vertikale Achse. Nun sehen⁷²⁾ Sie -wie beim Reflexionshologramm- ein pseudoskopisches Bild, das deutlich vor dem Film zu stehen scheint.

12.2.2 Informationsspeicherung im Hologramm

Eine interessante Eigenschaft von Hologrammen ist, daß jeder kleine Bereich des Hologramms eine unglaubliche Informationsfülle enthält:

Halten Sie Ihr Transmissionshologramm in den *unaufgeweiteten* Strahl⁷³⁾ und beobachten Sie das gebeugte Licht mit dem weißen Karton. Bei richtiger Stellung des Hologramms sehen Sie eine zweidimensionale Projektion Ihres Objektes.

Dabei ist folgendes besonders erstaunlich:

Je nachdem an welcher Stelle des Hologramms der Laser hindurch geht -welchen Teil der Information Sie also auslesen-, sehen Sie Ihr Objekt aus einer anderen Perspektive. Der kleine Bereich (ca. 1mm^2), den der Laser ausleuchtet, enthält die gesamte Information wie Ihr Objekt aus einer bestimmten Richtung aussieht.

Dieses Experiment läßt erahnen, welche unglaubliche Informationsflut in einem Hologramm gespeichert ist. Schon bei unserem „billigen“ Film sind es etwa 10^{10} Bits, entsprechend etwa 500.000 Schreibmaschinenseiten pro Kubikmillimeter Emulsion!! In der Zukunft werden vielleicht holografische Speicher (mit wiederverwendbaren Kristallen statt einer Emulsion) die gebräuchlichen Speichermedien verdrängen?!?

⁷¹⁾Auf die der Referenz-Strahl bei der Aufnahme eingefallen ist.

⁷²⁾Es bedarf unter Umständen einiger Übung, da Sie Ihr Auge nicht auf den Film sondern auf das Objekt fokussieren müssen, um etwas zu sehen. Oft hilft es, sich etwas vom Tisch zu entfernen und es aus größerer Entfernung nochmals zu versuchen!

⁷³⁾Quizfrage: „Welche Seite muß zum Laser zeigen?“

12.2.3 Vergrößerungen

Lassen Sie nun den *unaufgeweiteten* Laserstrahl auf den weißen Karton fallen. Benutzen Sie diesen Leuchtfleck, um Ihr Transmissionshologramm zu rekonstruieren. Sie werden erkennen, daß Ihr Objekt -je nach dem Abstand vom Hologramm zum Leuchtfleck- vergrößert oder verkleinert erscheint.

Wie würden Sie dieses Verhalten erklären??

In der Praxis lassen sich so tatsächlich Vergrößerungen anfertigen. Dies wird bei dem Aufbau für das Bildebenenhologramm in der Tat geschehen!

12.3 Bildebenenhologramm

12.3.1 Das Reflexionshologramm als Transmissionshologramm

Versuchen Sie, das Bildebenenreflexionshologramm im aufgeweiteten Laserstrahl zu rekonstruieren. Dies gelingt Ihnen sowohl als Reflexionshologramm, wie auch als Transmissionshologramm. Betrachten Sie es als Transmissionshologramm, so können Sie (mit etwas Geschick) Teile⁷⁴⁾ des Aufbaus zur Aufnahme des Bildebenen-Hologramms sehen. Wie ist das zu erklären?

Spione Achtung: Verstecke wichtige Informationen also in einem unscheinbaren Bildebenen-Reflexionshologramm!

12.3.2 Anmerkungen zum Bildebenenreflexionshologramm

1. Rekonstruiert man das Masterhologramm, so stellt man fest, daß das Objekt viel kleiner ist, als es nachher im Reflexionshologramm herauskommt. Das ist dem in 12.2.3 beschriebenen Vergrößerungseffekt zuzuschreiben. Bei unserer „Kopieranordnung“ haben wir keinen Kollimierungsspiegel⁷⁵⁾ eingebaut. Die Divergenz des Rekonstruktionslichtes erzeugt ein vergrößertes Bild, das wir beim Reflexionshologramm aufgenommen haben.
2. Stellt man sich tatsächlich eine Hohlform von einem Objekt her, so kann man diese natürlich auch als Reflexionshologramm aufnehmen. Es ist somit ein pseudoskopisches Objekt, das wir hinter dem Film aufnehmen. Rekonstruiert man das Hologramm dann von der „flaschen“ Seite, so hat man ein orthoskopisches Bild, das *vor* dem Film steht. So kann man Bildebenenhologramme auch ohne einen Kopiervorgang aufnehmen⁷⁶⁾.
3. Die meisten professionellen Hologramme sind Bildebenenhologramme.

⁷⁴⁾z.B. den Plattenhalter. Mit viel Glück können Sie den Text auf dem Masterhologramm lesen!

⁷⁵⁾Dieser erzeugt aus divergentem Licht paralleles Licht.

⁷⁶⁾Nur kann man nicht von beliebigen Objekten eine Hohlform herstellen!

A Zusammenfassung: Entwickeln

	Transmissionshologramme	Reflexionshologramme
Entwickeln	G5P-Entwickler 1-5Minuten	Pyrogallolentwickler: 1 Teil Pyrogallol 2 Teile Natriumcarbonat ca. 2 Minuten
Wässern	3 Minuten	3 Minuten
Bleichen	Nach Sicht	Nach Sicht
Wässern	15 Minuten	15 Minuten
Trocknen	Fön: kalt	Fön: kalt oder warm

B Literaturliste

Literatur

- [1] *Wissensspeicher Lasertechnik*, Fachbuchverlag Leipzig, 1989
- [2] Miles V. Klein und Thomas E. Furtak: *Optik*, Springer-Verlag, 1988
- [3] E. Hecht: *Optik*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [4] Ju. I. Ostrowski: *Holografie - Grundlagen, Experimente und Anwendungen*, Verlag Harri Deutsch, 1989
- [5] P. Hariharan: *Optical Holography*, Cambridge University Press, 1991
- [6] Rodney Loudon: *The Quantum Theory of Light*, Oxford University Press, 1991
- [7] Unterseher, Hansen und Schlesinger: *Handbuch der Holografie*, Popa Verlag, 1991

Anmerkungen zur Literaturliste:

Eine leicht verständliche und sehr empfehlenswerte Einführung mit etlichen Anwendungen der Holografie ist in [4] gegeben. An Beispielen werden viele verschiedene holografische Verfahren (wenn auch nicht sehr formal) diskutiert. Eine modernere Darstellung der Holografie und deren Anwendungen stellt wohl [5] dar. [1] enthält eine Zusammenfassung der Prinzipien der Lasertechnik sowohl in theoretischer, als auch in technischer Hinsicht. Darüber hinaus werden auch Anwendungen des Lasers diskutiert. Das Buch ist allerdings -der Name sagt es schon- eher ein Nachschlagewerk als ein Lehrbuch.

[2] und [3] sind Standardwerke, die in die Bibliothek eines jeden gehören, der sich näher für die Optik und deren Anwendungen interessiert.

” Profis ”, die sich für die Quantennatur des Lichtes (z.B. tieferliegende Aspekte der Kohärenz sowie Photonenstatistik) interessieren, sind mit [6] gut beraten. (Mit Holografie oder diesem Praktikum hat [6] eher wenig zu tun.)

Will man selbst Hologramme machen, so ist man mit [7] bestens bedient. Es wird die Do-it-Yourself-Herstellung der optischen Komponenten⁷⁷⁾ ebenso behandelt wie praktische Aufbauten und spezielle Tricks!

⁷⁷⁾Ein gekaufter Spiegel mit Halter kostet über 1kDM, ein Holografietisch gar 60kDM

Abbildungsverzeichnis

1	Darstellung einer ebenen Welle $t = 0$	9
2	Darstellung einer ebenen Welle $t = \frac{\pi}{2\omega}$	9
3	Darstellung einer ebenen Welle $t = \frac{\pi}{\omega}$	9
4	Darstellung einer ebenen Welle $t = \frac{3\pi}{2\omega}$	9
5	Maximale Feldstärke in einer ebenen Welle	11
6	Transversale, ebene Welle	14
7	Kugelwelle zur Zeit t_1	14
8	Kugelwelle zur Zeit t_2	14
9	Fresnel-Spiegel 1	16
10	Fresnel-Spiegel 2	16
11	Ebenen maximaler Intensität	18
12	Wellenvektoren	19
13	Überlagerung von Kugelwellen	19
14	Situation bei der Hologrammaufnahme	22
15	Situation bei der Hologrammrekonstruktion	24
16	Rekonstruiertes Hologramm	24
17	Aufnahme eines Fourierhologramms	25
18	Dennis Gabor	25
19	Aufnahme eines Regenbogenhologramms	27
20	Rekonstruktion eines Regenbogenhologramms	27
21	Mit Konvexlinse aufgeweiteter Strahl	28
22	Die Modenblende	28
23	„Verdrehte“ Modenblende	29
24	Falsche horizontale Position der Blende	30
25	Einstellung der Modenblende 1	30
26	Einstellung der Modenblende 2	30
27	Einstellung der Modenblende 3	31
28	Strahl bei fertig eingestelltem Pinhole	31
29	Spektrale Empfindlichkeit von 8E75	32
30	Schwärzungskurven	33
31	Michelsoninterferometer	37
32	Aufbau für Reflexionshologramme	39
33	Filmposition bei Reflexionshologrammen	40
34	Vollständiger Aufbau für Reflexionshologramme	40
35	Erweiterter Aufbau für Reflexionshologramme	42
36	Filmposition beim erweiterten Aufbau	43
37	Aufbau zur Aufnahme eines Transmissionshologramms	44
38	Aufbau zur Aufnahme eines Transmissionshologramms (vollständig)	46
39	Erweiterter Aufbau für Fortgeschrittene	47
40	Erweiterter Aufbau für Fortgeschrittene (vollständig)	48
41	Aufbau für ein Bildebenenhologramm	49
42	Aufbau für ein Bildebenenhologramm mit Blenden	50

Index

- ϵ , 6
- μ , 6
- ω , 10
- ρ , 5
- \vec{B} , 5
- \vec{D} , 5
- \vec{E} , 5
- \vec{H} , 5
- \vec{J} , 5
- k , 10
- n , 11
- 8E75, 32

- Agfa Holotest Film, 32
- Amplitudenhologramm, 26
- Amplitudentransparenz, 23, 33
- Auflösungsvermögen, 32
- Ausgangsleistung, 4

- Bild
 - orthoskopisches, 49, 52
 - pseudoskopisches, 49, 52
- Bildebenenhologramm, 49, 53
 - Anmerkungen, 53
 - mittels Hohlform, 53
 - Spielchen, 53
- Bleichbad, 34
- Bleichen, 26
- Blenden, 45
- Brechungsindex, 11

- dielektrischer Verschiebungsvektor, 5
- Dielektrizitätszahl, 6

- elektrische Polarisation, 5
- Emulsion, 33
 - Schrumpfung, 35
- Emulsionsseite, 33
- Energiedichte, 4
- Entwickeln, 54
- Entwickler, 34
 - Geheimrezepte, 35

- Feldstärke
 - elektrische, 5
 - magnetische, 5
- Film, 32
 - Schwärzungskurve, 32
 - spektrale Empfindlichkeit, 32
- Fourierhologramm, 25
- Fresnelsche Zone, 20
- Fresnelsche Zonenplatte, 20
- Fresnelscher Spiegel, 15

- G5P, 34
- Geheimrezepte, 35

- He-Ne-Laser, 4
- Hologramm
 - dünnes, 25
 - dickes, 25

- Interferenz, 15
 - bei Kugelwellen, 19
 - ebener Wellen, 15
- Interferenzen gleicher Dicke, 15
- Interferometrie, 26

- Kohärenz, 20
- Kollimierungsspiegel, 53
- konjugiertes Bild, 24
- Kreisfrequenz, 10

- Laser
 - Strahlenschutz, 4
- lineare Medien, 6
- Literatur, 55

- magnetische Flußdichte, 5
- Magnetisierung, 5
- Masterhologramm, 49
- Materialgleichungen, 5
- Maxwell, 5
- Maxwellgleichungen, 5
- Michelson-Interferometer, 15
- Michelsoninterferometer, 37
- Modenblende, 28
- monochromatisches Licht, 20

- Natriumcarbonat, 35
- Netzmittel, 34
- Newtonsche Ringe, 15

- Objektstrahl, 22
- optische Dichte, 33
- Orthoskopie, 49, 52
- orthoskopie, 52

- Permeabilitätszahl, 6
- Permittivitätszahl, 6
- Phasengeschwindigkeit, 11
- Phasenhologramme, 26
- Pinhole, 28
- Polarisation, 10
- Pseudoskopie, 49, 52
- pseudoskopie, 52
- Pyrogallolentwickler, 35

- Raumfilter, 28
- Referenzstrahl, 22
- Reflexionshologramm
 - Weißlicht-, 26
- Reflexionshologramm, 26, 52
 - als Kopie, 49
 - Aufbau, 39
 - Aufbau für Bildebenen-, 49
 - entwickeln, 35
 - Erweiterung, 42
 - Spielchen, 52
- Regenbogenhologramm, 26

- Schwärzungskurve, 32
- Strahlenschutz, 4
- Superpositionsprinzip, 13, 24

- Transmissionshologramm, 26, 52
 - einfacher Aufbau, 44
 - entwickeln, 34
 - erweiterter Aufbau, 47
 - Spielchen, 52
- transverale Wellen, 10

- Versuchsdurchführung, 36

- Weißlicht-Reflexionshologramm, 26
- Wellen
 - ebene, 7
 - Kugel-, 11
 - auslaufende, 12
 - einlaufende, 12
 - linear polarisierte, 10
 - transversale, 10
- Wellenfront, 11
- Wellengleichung, 7
- Wellenlänge, 10
 - He-Ne-Laser, 4
- Wellenzahlvektor, 10