# **Technische Universität Berlin**

Institut für Konstruktion, Mikro - und Medizintechnik

# **Fachgebiet Mikrotechnik**

# Prof. Dr. rer. nat. Heinz Lehr

# Übung Messtechnik

13. Übungseinheit

# Grundlagen der Wellennatur des Lichts und der Interferometrie

Wintersemester 2007 / 2008

# Übungsleiter:

Daniel Brüggemann	brueggemann@fmt.tu-berlin.de	Tel. 314 - 28942
DiplIng. Florian Bühs	fbuehs@fmt.tu-berlin.de	Tel. 314 - 79886
DiplIng. Moritz Buscher	buscher@fmt.tu-berlin.de	Tel. 314 - 21045
DiplIng. Robert Dreyer	dreyer@fmt.tu-berlin.de	Tel. 314 - 28943
DiplIng. Stefan Oginski	oginski@fmt.tu-berlin.de	Tel. 314 - 79886
René Péau	peau@fmt.tu-berlin.de	Tel. 314 - 28942
Jens Prochnau	prochnau@fmt.tu-berlin.de	Tel. 314 - 28942
Tino Schmidt	tschmidt@fmt.tu-berlin.de	Tel. 314 - 28942

#### Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Licht als elektromagnetische Strahlung	2
2.1	Monochromatisches Licht	4
2.2	Elektromagnetische Wellen	4
2.3	Beschreibung elektromagnetischer Wellen	5
2.4	Huygens'sches Prinzip	5
2.5	Elektrische Feldstärke als Träger der Energie	5
3	Interferenz	6
3.1	Kohärenz als Interferenzbedingung	6
3.2	Superpositionsprinzip und Formen der Interferenz	7
3.3	Interferenz am Doppelspalt	9
4	Beugung1	.1
4.1	Beugungsarten 1	1
5	Beispiele aus der Praxis1	2
5.1	Interferenzen gleicher Dicke 1	2
5.2	Newton'sche Ringe1	3
6	Laser 1	4
6.1	Laserlicht1	4
6.2	Prinzip des Lasers1	4
6.3	Grundaufbau eines Lasers 1	6
7	Interferometrie1	7
7.1	Michelson-Interferometer1	7
7.2	Beispiele für Interferometrie aus der Industrie1	8
8	Literaturverzeichnis1	.8
9	Verständnis- und Kontrollfragen1	.9
10	Praktischer Teil1	.9
10.1	Versuch: Beobachtung von Newton'schen Ringen auf der Oberfläche von	
	Objektträgern1	9
10.2	Vorführversuch: Beugung und Interferenz mit einem He-Ne-Laser 1	9
10.3	Vorführversuch: Demonstration am Michelson-Interferometer und Ermitteln	
	der Wellenlänge des Lasers2	21

#### 1 Einleitung

In der Optik unterscheidet man zwischen geometrischer Optik, auch als Strahlenoptik bezeichnet und der Wellenoptik. In der Strahlenoptik wird der Strahlengang des Lichts durch idealisierte Strahlen approximiert. Mit der geometrischen Optik lassen sich Eigenschaften wie Brechung und Reflexion erklären. Will man jedoch Interferenzerscheinungen und Beugung verstehen, dann ist die Betrachtung des Lichts als Welle unumgänglich.

Die Wellennatur des Lichts wurde von Thomas Young durch sein Doppelspaltexperiment im Jahre 1801 bewiesen (siehe Abbildung 1-1).



Abb. 1-1 Interferenzmuster eines Lasers am Doppelspalt

In dieser Übung wird vorrangig das Licht als Welle betrachtet. Weiterhin erfolgt eine kurze Einführung in die Funktion von Lasern, da im praktischen Teil der Übung die Überlagerung sowie die Beugung von Licht und die Laser-Interferometrie an Hand eines Helium-Neon-Lasers gezeigt werden. Laser steht für "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" und bedeutet "Lichtverstärkung durch induzierte Emission".

Anwendungen finden Laser heutzutage in der Industrie, der Medizintechnik, der Datenübertragung und in den Unterhaltungsmedien. Speziell in der Messtechnik wird der Laser aufgrund seiner hervorragenden Strahlqualität genutzt, um Abstandsmessungen im Nano-meterbereich vorzunehmen. Das hierfür verwendete Verfahren ist die Laser-Interferometrie, die auf der Überlagerung von Wellen beruht. Die zwei bekanntesten Interferometer sind das Mach-Zehnder-Interferometer und das Michelson-Interferometer. Letzteres wird im praktischen Teil der Übung gezeigt.

Ziel der Übung ist es, messtechnische Phänomene, die sich aufgrund der Wellennatur des Lichts ergeben, zu erläutern und die grundlegende Funktionsweise von Lasern und Interferometern zu verdeutlichen.

## 2 Licht als elektromagnetische Strahlung

Licht bezeichnet den für den Menschen sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung, welcher im Vergleich zum gesamten elektromagnetischen Spektrum (siehe Abbildung 2-1) nur sehr klein ist und im Wellenlängenbereich von 400-800 nm liegt. Der Frequenzbereich lässt sich mit  $f = c/\lambda$  zu 750 THz - 375 THz berechnen.



Abb. 2-1 Übersicht des elektromagnetischen Spektrums

Hierbei besteht folgende Beziehung:  $c_0 = \lambda_0 \cdot f$ 

- $c_0$ : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ )
- $\lambda_0$ : Wellenlänge im Vakuum
- f : Frequenz des Lichts, oft auch mit v bezeichnet
- Allgemein gilt:

$$\mathbf{c} = \lambda \cdot \mathbf{f} \tag{2}$$

für homogene Materie, wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Medium ist. Die Frequenz f bleibt beim Übergang in Materie konstant, dagegen ändert sich die Wellenlänge  $\lambda$  beim Übergang in Materie (vgl. Abbildung 2-2).



Abb. 2-2 Verhalten der Wellenlänge in Materie

(1)

#### 2.1 Monochromatisches Licht

Monochromatisch bedeutet, dass Licht als elektromagnetische Strahlung nur eine bestimmte Wellenlänge aufweist, das Licht ist dann einfarbig. Wie man in Abbildung 2-3 erkennt, ergibt sich für monochromatisches Licht in der spektralen Darstellung eine scharfe Linie und keine Verteilung mit  $\Delta f$ , wie es beispielsweise bei einer Glühlampe oder bei Tageslicht der Fall ist.



Abb. 2-3 Intensitätsverteilung links: monochromatisches Licht (z.B. He-Ne-Laser) Intensitätsverteilung rechts: z.B. bei einer Leuchtdiode

#### 2.2 Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen. Ein Beispiel für Longitudinalwellen sind Schallwellen.

Bei elektromagnetischen Wellen oszilliert die elektrische Feldstärke E senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, senkrecht dazu die magnetische Induktion B mit gleicher Frequenz. Daher spricht man von transversalen elektromagnetischen Wellen. Schwingt E nur in einer Richtung, handelt es sich um polarisiertes Licht.



Abb. 2-4 Elektromagnetische Welle

Die Basis für die Betrachtung des Lichts als elektromagnetische Welle beruht auf der Wellentheorie von Maxwell, die in den Maxwell´schen Gleichungen dargelegt ist. Dabei entsteht Licht durch Schwingungen von Ladungen.

#### 2.3 Beschreibung elektromagnetischer Wellen

Zur Veranschaulichung betrachten wir nur harmonische Wellen. Sie beschreiben das Licht eines Lasers recht gut.

Eine Welle wird zeitlich und räumlich durch das sich ausbreitende elektrische Feld E beschrieben.

$$E(t, z) = E_0 \cdot \cos \cdot (\omega \cdot t - k \cdot z + \varphi)$$
(3)

Das gesamte Argument in der Klammer wird als Phase bezeichnet.

```
E_0 ist die Amplitude

\omega die Kreisfrequenz, mit \omega = 2 \pi \cdot f

k = 2 \pi / \lambda, die Wellenzahl bzw. der Wellenvektor

t die Zeit

\phi die Anfangsphase bzw. der Nullphasenwinkel

z der Weg
```

Der Ausdruck  $k \cdot z$  gibt an, wie weit die Welle bei t = 0 s vorangeschritten ist, das heißt, wie viele Wellenzyklen bereits durchlaufen worden sind.  $\omega \cdot t$  beschreibt die momentane Phase einer beim Ort 0 beginnenden Welle.

## 2.4 Huygens'sches Prinzip

Interferenzen lassen sich gemäß dem Huygens'schen Prinzip erklären, welches nach Christiaan Huygens (1629-1695) benannt ist:

Dieses besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer sekundären Elementarwelle angesehen werden kann, die sich mit gleicher Geschwindigkeit und Wellenlänge wie die ursprüngliche Welle ausbreitet. Mit diesem Prinzip lassen sich fast alle Phänomene in der Wellenoptik erklären.

# 2.5 Elektrische Feldstärke als Träger der Energie

Kein Sensor ist in der Lage, die zeitliche Variation der elektrischen Feldstärke direkt zu messen. Beleuchtet man einen Sensor jedoch mit Licht über einen Belichtungszeitraum, so wird auf dem Sensor eine Energiemenge detektiert. Betrachtet man nun die Energie je belichteter Fläche, so spricht man von der Energiedichte. Sie besitzt die Einheit J / m<sup>2</sup>. Wird die Lichtmenge in einer gewissen Zeit aufgebracht, kommt man auf den Begriff der Leistungsdichte. Diese ist also die pro Zeit- und Flächeneinheit eingestrahlte Energie, welche auch als Intensität oder Bestrahlungsstärke bezeichnet wird.

Wie man aus Abbildung 2-4 erkennen kann, lässt sich die elektromagnetische Welle durch das voranschreitende elektrische und das magnetische Feld beschreiben, wodurch der Energietransport erfolgt und zur Bestrahlungsstärke am Sensor führt. Die Lichtenergie ist in gleichen Teilen auf das elektrische und das magnetische Feld verteilt, was zur Folge hat, dass es genügt, nur eine Größe zu betrachten, um die Intensität zu ermitteln. Die Intensität ist pro-portional zum Quadrat des elektrischen Felds. Da kein Detektor die hohen Frequenzen der elektromagnetischen Strahlung (500 THz) zeitlich auflösen kann, betrachten wir die zeitliche Mittelung der eingestrahlten Intensität.

$$\mathbf{I} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{c} \cdot \left\langle \mathbf{E}^2 \right\rangle_{\mathrm{T}}$$
 (5)

Mit  $\langle E^2 \rangle_{T}$  als zeitlichen Mittelwert des Quadrates der elektrischen Feldstärke.

Der zeitliche Mittelwert einer Funktion ergibt sich allgemein zu:

$$\left\langle f(t) \right\rangle_{T} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} f(t) dt$$
 (6)

Somit besteht folgender Zusammenhang:

$$\mathbf{I} = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{c} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}_0^2 \tag{7}$$

mit  $E_0^2$ als Quadrat der Amplitude der elektrischen Feldstärke und der Dielelektrizitätszahl  $\varepsilon$ mit  $[\varepsilon] = \frac{As}{Vm}$ .

#### 3 Interferenz

#### 3.1 Kohärenz als Interferenzbedingung

Interferenzerscheinungen entstehen durch die Überlagerung von Wellen im Raum. Die Voraussetzung für interferierende Wellen sind feste Phasenbeziehungen zwischen den Teilwellen. Diese Erscheinung kann man jedoch nur bei kohärentem Licht beobachten. Die Kohärenz beschreibt die zeitliche und örtliche Korrelation der Phasen von Wellen. Teilwellen mit zufällig schwankenden Phasenbeziehungen sind inkohärent, solche mit zeitlich konstanter Phase kohärent.

Bislang betrachteten wir monochromatisches Licht, welche nur eine diskrete Wellenlänge aufweist. In der Realität gibt es aber kein ideal monochromatisches Licht. Das heißt, jede Lichtquelle emittiert Licht mit einer spektralen Verteilung der Breite  $\Delta \lambda$  und einer mittleren Wellenlänge  $\lambda_0$ , so dass hier nur näherungsweise Kohärenz vorliegen kann. Bezeichnet t<sub>k</sub> die Kohärenzzeit und l<sub>k</sub> die Kohärenzlänge, gilt:

$$l_k \approx c \cdot t_k \tag{8}$$

Je größer die Kohärenzzeit ist, desto monochromatischer ist die Quelle. Nur ein unendlich langer harmonischer Wellenzug könnte demnach monochromatisch sein.

Bei natürlichem Licht besteht zwischen den Teilabschnitten eines Lichtstrahls keine feste Phasenbeziehung. Die Relativphasen sind vielmehr statistisch verteilt, so dass keine Interferenz auftreten kann. Dagegen ist bei Laserlicht zwischen einzelnen Abschnitten die Phase  $\varphi$  konstant. Die Kohärenzlängen bei guten Lasern betragen mehr als 400 m und weisen nur geringe Divergenzen auf. Damit ist der Laser eine ideale Lichtquelle, um Interferenzeffekte zu demonstrieren. Tageslicht besitzt im Vergleich dazu nur eine Kohärenzlänge von etwa 900 nm. Man betrachte hierzu die Abb. 3-1.



Abb. 3-1 Vergleich verschiedener Lichtquellen und ihrer Phasenbeziehungen: a = Glühbirne, b = Taschenlampe, c = Laser

#### 3.2 Superpositionsprinzip und Formen der Interferenz

Interferenzen entstehen durch Überlagerung von Wellen. Dabei gilt das Superpositionsprinzip: aus zwei sich überlagernden Wellen entsteht eine resultierende Welle, bei der an jedem Punkt die Amplitude durch Summation der Teilamplituden entsteht. Kommt es zur Überlagerung zweier Lichtstrahlen, addieren sich die Feldstärken ( $E_1$  und  $E_2$ ).

Für die resultierende Feldstärke ergibt sich:

$$E_{res} = E_1(z_1, t_1) + E_2(z_1, t_1),$$
(9)

Die Gesamtintensität folgt aus (5):

$$\mathbf{I}_{ges} = \varepsilon \cdot \mathbf{c} \cdot \left\langle \left( \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \right)^2 \right\rangle$$
 (10)

$$\Rightarrow I_{ges} = \varepsilon \cdot c \cdot \left( \left\langle E_1^2 \right\rangle + \left\langle E_2^2 \right\rangle + 2 \cdot \left\langle E_1 + E_2 \right\rangle \right)$$
(11)

$$I_{ges} = I_1 + I_2 + I_{12}$$
(12)

mit 
$$I_1 = \varepsilon \cdot c \cdot \langle E_1^2 \rangle$$
 (13)  $I_2 = \varepsilon \cdot c \cdot \langle E_2^2 \rangle$  (14)  $I_{12} = 2 \cdot \varepsilon \cdot c \cdot \langle E_1 \cdot E_2 \rangle$  (15)

wobei man den letzten Term als Interferenzterm bezeichnet.

$$\mathbf{E}_{1}(\mathbf{t},\mathbf{z}_{1}) = \mathbf{E}_{01} \cdot \cos \cdot \left( \omega \cdot \mathbf{t} - \mathbf{k} \cdot \mathbf{z}_{1} + \boldsymbol{\varphi}_{1} \right)$$
(16)

und 
$$E_2(t,z_2) = E_{02} \cdot \cos \cdot (\omega \cdot t - k \cdot z_2 + \varphi_2)$$
 (17)

ergibt sich für den zeitlichen Mittelwert durch Auflösen des Integrals nach Gleichung (6) folgender Ausdruck:

$$\langle \mathbf{E}_{1}^{2} \rangle = \frac{1}{2} \mathbf{E}_{01}^{2} \left[ \cos^{2} (\mathbf{k} \cdot \mathbf{z}_{1} + \phi_{1}) + \sin^{2} (\mathbf{k} \cdot \mathbf{z}_{1} + \phi_{1}) \right]$$
 (18)

$$\Rightarrow \quad \left\langle \mathbf{E}_{1}^{2} \right\rangle = \frac{1}{2} \mathbf{E}_{01}^{2} \tag{19}$$

Man beachte, dass die elektrische Feldstärke laut Gleichung (5) quadriert wird. Entsprechendes ergibt sich für  $\langle E_2^2 \rangle$ .

Für den Interferenzterm (14) gilt nach zeitlicher Mittelung:

$$\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = \frac{1}{2} E_{01} E_{02} \cdot \cos(kz_1 - kz_2 + \varphi_1 - \varphi_2)$$
 (20)

$$\Rightarrow \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle = \frac{1}{2} \mathbf{E}_{01} \mathbf{E}_{02} \cdot \cos\delta$$
 (21)

 $\delta$  steht hier für die Phasenverschiebung der beiden Wellen. Sie ergibt sich aus der kombinierten Weglänge und dem Anfangsunterschied der Phasenwinkel.

Für die Gesamtintensität Iges folgt nach Gleichung (10):

$$\mathbf{I}_{ges} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot c \cdot \left( \mathbf{E}_{01}^2 + \mathbf{E}_{02}^2 + 2 \, \mathbf{E}_{01} \mathbf{E}_{02} \cos \delta \right)$$
(22)

oder

Aus

$$\mathbf{I}_{ges} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + 2 \cdot \sqrt{\mathbf{I}_1 \mathbf{I}}_2 \cos\delta$$
 (23)

Bei gleicher Feldstärke  $E_1 = E_2 = E_0$  ergibt sich damit der vierfache Wert der Intensität, wenn zwei elektromagnetische Wellen miteinander interferieren, während sich die Feldstärken nur verdoppeln.

Maximal wird der Wert bei  $\delta = 0^{\circ}$ :

$$I_{ges} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot c \cdot \left[ E_0^2 + E_0^2 + 2 E_0^2 \cos \delta \right] = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot c \cdot 4 E_0^2$$
(24)

Minimal wird der Wert bei einer Phasenverschiebung von  $\delta = 180^{\circ}$ :

$$I_{ges} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot c \cdot \left[ E_0^2 + E_0^2 + 2 E_0^2 \cos \delta \right] = 0$$
 (25)

Bei den beiden Extremfällen handelt es sich um vollständig konstruktive Interferenz ( $\delta = 0^{\circ}$ ) und vollständig destruktive Interferenz ( $\delta = 180^{\circ}$ ). Maxima ergeben sich bei  $\delta = 2 \pi \cdot m$  und Minima bei  $\delta = \pi \cdot (2 m + 1)$ , mit m = 0, ± 1, ± 2, ± 3...

Verstärken sich die Amplituden der überlagernden Wellen, so spricht man von konstruktiver Interferenz. Schwächen sie sich ab, handelt es sich um destruktive Interferenz. In der Ab-bildung 3-2 sind diese beiden Fälle dargestellt.



Abb. 3-2 Konstruktive und destruktive Interferenz als elementare Formen der Interferenz

Betrachtet man nur monochromatisches Licht, lassen sich konstruktive und destruktive Interferenz folgendermaßen beschreiben:

**Konstruktive Interferenz** entsteht, wenn der Gangunterschied a zwischen zwei Teilwellen gleicher Wellenlänge  $0 \le a < \lambda/2$  beträgt. Maximal interferieren die Wellen, wenn der Gangunterschied ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge  $n \cdot \lambda$  ergibt (vollständig konstruktive Interferenz).

**Destruktive Interferenz** entsteht, wenn der Gangunterschied a zwischen zwei Teilwellen gleicher Wellenlänge  $\lambda/2 \le a < \lambda$  beträgt. Die Wellen löschen sich bei gleicher Amplitude vollständig aus, wenn für den Gangunterschied die Bedingung  $(n + 0.5)\lambda$  gilt.

# **3.3 Interferenz am Doppelspalt**



Abb. 3-3 Überlagerung von Kreiswellen ausgehend von den beiden Spalten S1 und S2

In der Abbildung 3-3 sieht man ebene Wellenfronten auf zwei schmale Spalte  $S_1$  und  $S_2$  zulaufen. Die vertikalen Linien repräsentieren jeweils die Wellenberge. An den Spalten entstehen Kreiswellen (Huygens'sches Prinzip). Durch die Überlagerung der Kreiswellen entstehen Gebiete mit hoher und Gebiete mit niedriger Intensität. Bei den weißen Bereichen bzw. Streifenmustern handelt es sich um Maxima und bei den schwarzen Bereichen um Minima der Intensität, welche die konstruktive bzw. die destruktive Interferenz widerspiegeln.

Man kann diesen Versuch auch mit Wasserwellen demonstrieren. Trifft eine ebene Wasserwellenfront auf einen Spalt, so entstehen Kreiswellen. Hinter einem Doppelspalt interferieren die entstandenen Kreiswellen miteinander und es entstehen Wellenberge und Wellentäler.

In der Abbildung 3-4 ist die Überlagerung zweier Elementarwellen bei Young's Doppelspaltexperiment dargestellt. In der Realität ist der Abstand s vom Doppelspalt zum Schirm gegenüber der Strecke a zwischen den beiden Spaltöffnungen sehr groß. Der Faktor zwischen a und s beträgt einige Tausend.

Die optische Weglängendifferenz der beiden Strahlen von  $S_1$  und  $S_2$  nach P kann in guter Näherung bestimmt werden. Hierzu fällt man das Lot vom Punkt  $S_2$  auf  $\overline{S_1P}$ . Das Lot schnei-det die Strecke im Punkt B.

Die Differenz der beiden Strahlen ist gegeben durch:

$$\overline{(\mathbf{S}_1\mathbf{B})} = (\overline{\mathbf{S}_1\mathbf{P}}) - (\overline{\mathbf{S}_2\mathbf{P}})$$
(26)

Für großen Abstand zum Schirm beträgt sie:

$$(\overline{\mathbf{S}_1\mathbf{B}}) = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 \tag{27}$$

Demnach ergibt sich aus Abbildung 3-4 folgender Zusammenhang:

$$\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = \mathbf{a} \cdot \sin\theta \tag{28}$$



Abb. 3-4 Young'sches Doppelspaltexperiment

Da der Abstand s gegenüber a sehr groß ist, gilt in guter Näherung  $\sin\theta \approx \theta$  und man erhält:

$$\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 \approx \mathbf{a} \,\boldsymbol{\theta} \tag{29}$$

Unter der gleichen Betrachtung für kleine Winkel folgt:

$$\theta \approx \frac{y}{s} \tag{30}$$

Setzen wir (30) in (29) ein, ergibt sich:

$$\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 \approx \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{s}} \mathbf{y} \tag{31}$$

Gemäß Abschnitt 3.2 tritt vollständig konstruktive Interferenz auf, wenn

$$\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\lambda} \tag{32}$$

Das heißt also, wenn der Wegunterschied zwischen beiden Strahlen ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge beträgt, kommt es zu einem Maximum der Intensität. Für das erste Maximum gilt dementsprechend:

$$\theta_1 \approx \frac{y_1}{s} \tag{33}$$

Setzt man (32) in (31) ein und löst nach y auf, folgt für die Position des n-ten hellen Streifens:

$$y_{n} = \frac{s}{a} n \cdot \lambda$$
 (34)

Entsprechend ergibt sich die Winkelposition des n-ten Maximums aus den Gleichungen (34) und (30) zu:

$$\theta_{n} = \frac{n \cdot \lambda}{a}$$
(35)

Im praktischen Teil der Übung werden die Streifen rot auf dem Schirm zu erkennen sein, da wir mit rotem Laserlicht ( $\lambda = 633$  nm) arbeiten.

#### 4 Beugung

Beugung ist ein Phänomen, das aufgrund der Welleneigenschaft des Lichts zustande kommt. Beugung tritt erst in Erscheinung, wenn die Abmessungen der Hindernisse, auf die Licht trifft, mit der Wellenlänge des Lichts vergleichbar werden, also bei Abmessungen von einigen Mikrometern. Das Licht breitet sich dann nicht mehr geradlinig aus. Das lässt sich durch das Huygens'sche Prinzip anhand des Doppelspaltexperiments erklären.

#### 4.1 Beugungsarten

Grundsätzlich unterscheidet man zwei verschiedene Beugungsarten:

#### Fresnel'sche Beugung

#### Fraunhofer'sche Beugung

Die grundlegenden Unterschiede der Fresnel- und Frauenhoferbeugung lassen sich am Doppelspalt zeigen. Betrachtet man die Intensitätsverteilung direkt hinter dem Spalt, so erhält man ein Bild, das dem zweier Spalte entspricht. Hierbei handelt es sich um die Fresnel'sche Beugung, die auch als Nahfeldbeugung bezeichnet wird. In großer Entfernung, relativ zur Spaltbreite betrachtet, entsteht auf einem Schirm ein regelmäßiges Muster, an dem zunächst nicht abzulesen ist, dass zwei Spalte zur Erzeugung verwendet werden. Hierbei handelt es sich um die Fraunhoferbeugung (Fernfeldbeugung), siehe Abbildung 4-1.



Abb. 4-1 Intensitätsverteilung hinter einem Doppelspalt (Fraunhoferbeugung)

## 5 Beispiele aus der Praxis

Interferenz und Beugung sind in weiten Teilen unserer Umwelt wahrnehmbar, wie z.B. dünne Ölschichten auf Wasser oder bunt schimmernde Seifenblasen. Arbeitet man mit Kameras oder anderen optischen Elementen, wird die theoretische Obergrenze der Bildqualität durch Beugung an der Blende bestimmt.

## 5.1 Interferenzen gleicher Dicke



Abb. 5-1 Interferenzen gleicher Dicke an einer in einem Drahtrahmen eingespannten Seifenlamelle

Die Streifen in Abbildung 5-1 bezeichnet man als Interferenzen gleicher Dicke. Infolge der Schwerkraft entsteht in dem Drahtrahmen eine keilförmige Schichtdicke der Seifenhaut. Oben ist die Haut dünner als unten. Erkennbar sind diese Interferenzerscheinungen jedoch nur an dünnen und durchsichtigen Schichten, wie in diesem Beispiel oder an dünnen Ölschichten. Trifft weißes Licht auf die dünne Seifenhaut, dann wird ein Teil direkt von der oberen Schicht reflektiert, ein Teil wird im Medium gebrochen und an der unteren Seite reflektiert, wie in Abbildung 5-2 zu sehen.



Abb. 5-2 Interferenz an dünnen Schichten

Da das Licht an der oberen Grenzfläche am optisch dichteren Medium reflektiert wird ( $n_1 < n_2$ ), muss ein Phasensprung von  $\pm \pi$  berücksichtigt werden. Überlagern sich die an der oberen Grenzschicht sowie an der unteren Grenzschicht reflektierten Wellenzüge, kommt es zu den Farberscheinungen, welche sämtliche Spektralfarben enthalten. Die keilförmige Schichtdicke der Seifenhaut weist immer wieder Vielfache der Wellenlänge der verschiedenen Farben auf (unter Berücksichtigung des Phasensprungs). Konstruktive Interferenz der beiden Wellenzüge tritt für eine bestimmte Farbe (Wellenlänge  $\lambda$ ) dann auf, wenn der Weg des Lichts im optisch dichten Medium  $\lambda / 2 + n \cdot \lambda$  beträgt. Mit dem Phasensprung  $\pi$  an der Oberfläche der anderen Welle führt dies zu (n + 1)· $\lambda$  und damit zur konstruktive Interferenz.

#### 5.2 Newton'sche Ringe

Eine weitere Möglichkeit Interferenz gleicher Dicke nachzuweisen, soll folgendes Beispiel zeigen, das auch praktisch in der Übung veranschaulicht wird. Drückt man zwei Objektträger aus Glas gegeneinander, so befindet sich zwischen ihnen eine eingeschlossene Luftschicht, die im Allgemeinen nicht einheitlich dick ist. Unter Zimmerbeleuchtung ist eine Reihe un-regelmäßiger farbiger Streifen zu erkennen. Diese bezeichnet man als Interferenzstreifen gleicher Dicke. Solche Interferenzbänder können analog zu Höhenlinien auf topographischen Karten betrachtet werden. Jeder Streifen entspricht dem geometrischen Ort aller Punkte auf der Schicht mit gleicher optischer Dicke. Unter Druckeinwirkung verringert sich die Dicke der Luftschicht zwischen den Objektträgern, was eine Veränderung der Streifen nach sich zieht. Drückt man mit einem Stift auf die zwei Glasscheiben, so kann man um diesen Punkt konzentrische, fast kreisrunde Ringe beobachten, welche als Newton'sche Ringe bezeichnet werden. Eine praktische Anwendung für die Interferenz gleicher Dicke ist die Untersuchung der Oberflächenqualität optischer Elemente, wie Linsen und Prismen.

#### 6 Laser

## 6.1 Laserlicht

Das Laserlicht ist eine Form der Strahlung, die scharf gebündelt, einfarbig (monochromatisch) und kohärent ist. Daraus resultiert eine enorm hohe spektrale Intensität.

#### Es wird darauf hingewiesen, dass der Umgang mit Lasern gefährlich ist und unsachgemäßer Umgang zu schweren gesundheitlichen Schäden führen kann!

Die in dieser Übung verwendeten Laser gehören der Laserschutzklasse II an und sind demnach bei vorsichtiger Handhabung ungefährlich.

Man sollte aber niemals- egal bei welchem Laser- direkt in den Laserstrahl blicken!

# 6.2 Prinzip des Lasers

Laser beruhen auf der erzwungenen Aussendung von Strahlung, der so genannten stimulierten Emission.

In einem Atom oder Molekül können Elektronen nur diskrete Energien annehmen. Sind die Elektronen nicht angeregt, befinden sie sich im Grundzustand, da dieser energetisch am günstigsten ist. Nehmen sie Energie in Form von Wärme, Strahlung oder durch den Zusammenstoß mit schnellen Teilchen auf, können sie auf ein höheres Energieniveau gehoben werden. Geschieht die Anregung durch ein Photon, muss dessen Energie der Differenz der beiden Energieniveaux entsprechen. Bei diesem als Absorption bezeichneten Vorgang, wird die gesamte Photonenenergie auf die Materie übertragen, siehe Abbildung 6-1. Im Photonenbild ist die Energie nur von der Frequenz v abhängig:

$$\mathbf{E}_{\text{Photon}} = \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1 = \mathbf{h} \cdot \boldsymbol{\nu} \tag{36}$$

wobei h =  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Js das Planck´sche Wirkungsquantum ist.



Abb. 6-1 Absorption

Im angeregten Zustand verweilt das Elektron nur ca.  $10^{-8}$  s (Lebensdauer), da der angeregte Zustand nicht stabil ist. Es fällt wieder auf das untere Energieniveau zurück, was als spontane Emission bezeichnet wird und in Abbildung 6-2 dargestellt ist.



Abb. 6-2 Spontane Emission

Dabei gibt das Elektron die überschüssige Energie in Form eines Photons ab. Die Energie entspricht der Energiedifferenz zwischen angeregtem Zustand und Grundzustand. Das emittierte (ausgesandte) Photon bzw. Lichtquant bewegt sich nun in eine beliebige Richtung. Jeder spontane Emissionsakt ist ein Zufallsereignis. Die Lebensdauer gibt an, wann statistisch mehr die als Hälfte der Elektronen nach der Anregung wieder in den Grundzustand zurückfallen.

Die Lichtemission kann auch durch ein einfallendes Photon mit der gleichen Frequenz v ausgelöst werden und das Elektron dazu veranlassen, in den unteren Zustand überzugehen, bevor es spontan sowieso "nach unten" fallen würde. Man spricht von stimulierter Emission, siehe Abbildung 6-3.



Abb. 6-3 Stimulierte Emission

Die, aufgrund der Energieerhaltung, abgegebenen beiden Photonen besitzen die gleiche Richtung und sind zu einander kohärent. Alle durch stimulierte Emission erzeugten Photonen können wieder zu stimulierter Emission führen, indem sie auf weitere angeregte Elektronen treffen. Spontane Emission und Absorption stellen Konkurrenzprozesse zur stimulierten Emission dar. Ein Photon kann entweder ein Atom bzw. Molekül im Grundzustand durch Absorption anregen, oder zur stimulierten Emission eines angeregten Atoms führen. Nur im letzteren Fall kommt es zu einer Lichtverstärkung, während Absorptionsprozesse Photonen entziehen. Eine lawinenartige Verstärkung ist nur möglich, wenn sich mehr Atome im angeregten als im Grundzustand befinden, da dann die Wahrscheinlichkeit für die stimulierte Emission überwiegt. Diese Umkehr der normalen Besetzungsverhältnisse wird Besetzungsinversion genannt und ist nicht stabil. Deshalb muss dieser Zustand durch stetige Energiezufuhr, so genanntes Pumpen aufrechterhalten werden, da angeregte Atome durch die spontane Emission wieder in den Grundzustand zurückkehren. Das Pumpen kann optisch, durch Stöße zwischen Gasatomen oder durch elektrischen Strom erfolgen. Zunächst werden die Elektronen auf ein höheres Energieniveau, das Pumpniveau, angeregt, von dem sie ohne Aussendung von Licht in ein niedri-geres übergehen. Bei diesem handelt es sich um das obere Laserniveau, auf dem sich die Elektronen sammeln. Wichtig ist dabei, dass die Lebensdauer (bezüglich spontaner Emission) dieses Energieniveaus sehr viel größer ist, als üblich (zum Beispiel 10<sup>-3</sup> s). Dadurch kann das obere Laserniveau bei vielen Atomen / Molekülen besetzt werden, wobei die spontane Emission sehr gering ist. Bei einem 3-Niveau-System ist das untere Laserniveau der Grundzustand, siehe Abbildung 6-4.

Pumpen eines 3-Niveau-Lasers



Abb. 6-4 Pumpen eines Drei-Niveau-Lasers

#### 6.3 Grundaufbau eines Lasers

Jeder Laser besteht grundsätzlich aus einem Lasermedium, in dem die stimulierte Emission stattfindet, einer Energiequelle und einem Resonator (Abb. 6-5). Im Resonator, der aus einem Spiegel und einem teildurchlässigen Spiegel besteht, wird die Strahlung verstärkt.



Abb. 6-5 Allgemeiner Aufbau eines Lasers

Mit der Energiequelle bzw. Pumpquelle wird dem aktiven Medium Energie zugeführt, so dass eine Besetzungsinversion stattfinden kann. Die Energiequelle kann optischer, elektrischer oder chemischer Natur sein. Das Lasermedium kann aus gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffen bestehen. Die beiden Spiegel bilden eine Rückkopplungsanordnung und verstärken die Strahlung, indem Lichtquanten zwischen an den Spiegeln vielfach reflektiert wurden und dabei immer wieder das Lasermedium passieren. Der teildurchlässige Spiegel koppelt einen Teil der Strahlung aus. Es wird nur paralleles Licht ausgekoppelt, da schräg auf die Spiegel treffende Photonen schnell seitlich aus dem Resonator heraus reflektiert und nicht verstärkt werden.

# 7 Interferometrie

Die Interferometrie ist ein Verfahren, das die Interferenz von Lichtwellen ausnutzt um eine präzise Vermessung von Oberflächen sowie Längenmessungen durchzuführen. Alle Interferometer basieren auf dem gleichen Prinzip. Ein einfallender Lichtstrahl wird in mehrere Teilstrahlen aufgespaltet. Dies kann durch Teilen der Wellenfront mit einem Doppelspalt oder durch Teilen der Amplitude mit einem teildurchlässigen Spiegel erreicht werden. Nachdem die Strahlen unterschiedliche optische Wege durchlaufen haben, werden sie zusammen geführt und interferieren miteinander. Werden Teilstrahlen genau um eine Wellenlänge verschoben, entsteht wieder das gleiche Interferenzmuster.

## 7.1 Michelson-Interferometer

Das Michelson-Interferometer ist benannt nach Albert Michelson (1852-1931) und wurde erstmals 1881 eingesetzt. In diesem Interferometer findet eine Teilung des Lichtstrahls mittels Amplitudenaufspaltung statt. Die Abbildung 7-1 zeigt den schematischen Aufbau eines Michelson-Interferometers.



Abb. 7-1 Grundaufbau eines Michelson-Interferometers. Punktierte Linien bezeichnen die Strahlwege nach der Reflexion an den Spiegeln S<sub>1</sub> und S<sub>2</sub>

Der Laserstrahl trifft von der Lichtquelle ausgehend auf einen teildurchlässigen Spiegel mit  $45^{\circ}$  Neigung. Ein Teil des Strahls wird reflektiert und trifft auf den beweglichen Spiegel S<sub>1</sub>, der andere Teilstrahl transmittiert und trifft auf S<sub>2</sub>. Beide Strahlen werden zurückgeworfen und treffen nochmals auf den Strahlteiler. Jetzt werden die Teilstrahlen wieder reflektiert bzw. transmittiert und treffen auf den Detektor. Aber auch zurück zur Strahlquelle werden die Teilstrahlen reflektiert und transmittiert, was zur Folge hat, dass auch an der Strahlquelle Interferenzmuster zu erkennen sind. Bei einer kontinuierlichen Bewegung des Spiegels S<sub>1</sub> tritt beispielsweise am Detektor nacheinander eine periodische Folge von Maxima und Minima auf.

Durch die Bewegung von S<sub>1</sub> ergeben sich Phasenunterschiede  $\Delta \phi$  der beiden Lichtstrahlen, was zur Variation der Lichtintensität am Detektor führt. Die Abhängigkeit der Intensität vom Phasenversatz  $\Delta \phi$  der beiden Teilstrahlen berechnet sich zu:

$$I(\Delta \varphi) = \frac{I_{max}}{2} \left[ 1 + \cos \left( \Delta \varphi \right) \right]$$
(37)

Durch die Messung der Lichtintensität lassen sich weit geringere Verschiebungen als eine halbe Wellenlänge detektieren. Gute Interferometer können Wegunterschiede im Promillebereich der Wellenlänge und weniger detektieren.

Zu berücksichtigen ist, dass jeder Weg Strahlteiler / Spiegel ( $S_1$  und  $S_2$ ) doppelt durchlaufen wird. Bewegt man den Spiegel  $S_1$  um die Strecke s auf den Strahlteiler zu, verringert sich der optische Weg des Strahls um 2 s. Das heißt, für eine Wegänderung, die der halben Wellenlänge des verwendeten Lichts entspricht, wird ein Hell-Dunkel-Wechsel am Detektor registriert. Bezeichnet N die Anzahl der registrierten Hell-Dunkel-Durchläufe, so gilt:

$$N = \frac{2 \cdot s}{\lambda}$$
(38)

Abschließend sei erwähnt, dass Interferometer empfindliche Messgeräte sind, die auf kleine Veränderungen der Umgebungseinflüsse (Druck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit) mit starken Schwankungen reagieren. Präzise Messungen lassen sich daher nur in speziell dafür vorgesehenen Räumen bzw. im Vakuum durchgeführt werden.

#### 7.2 Interferometrie im industriellen Bereich

Interferenzmikroskope: mit diesen Mikro-Interferometern lassen sich Prüfungen von Oberflächen vornehmen.

Faserkreisel / Laserkreisel: diese Interferometer werden als Navigationshilfen verwendet.

**Radarinterferometrie:** hiermit lassen sich beispielsweise Bewegungen (Höhenunterschiede) auf der Erdoberfläche vermessen.

**Sagnac-Interferometer:** mithilfe des Sagnac-Interferometers (Gyroskop) kann man Rotationsgeschwindigkeiten messen. Es dient zur Navigation bei Satelliten und Flugzeugen.

**Mach-Zehnder-Interferometer:** sie werden häufig verwendet, um Dichteschwankungen in Gasströmungen zu verfolgen, beispielsweise in Windkanälen.

#### 8 Literaturverzeichnis

- [1] Hecht, E., Optik, 4. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, Wien, 2002
- [2] Perez, J. Ph., Optik, Spektrum Verlag, Heidelberg, 1996
- [3] Lipson, S. G., Optik, Springer Verlag, Heidelberg, 1997
- [4] Anders- von Ahlften, A., Altheide, H.-J., Laser- das andere Licht, TRIAS-Thieme Hippokrates Enke Verlag, Stuttgart, 1989

#### 9 Verständnis- und Kontrollfragen

- 1. Was sagt das Huygens'sche Prinzip aus?
- 2. Welche Formen der Interferenz kennen Sie?
- 3. Welche Eigenschaften muss Licht besitzen, damit Interferenz beobachtet werden kann?
- 4. Wie kann der Abstand zwischen den einzelnen Maxima beim Doppelspaltexperiment bestimmt werden?
- 5. Wie heißen die Ihnen bekannten Beugungsarten und wodurch unterscheiden sie sich?
- 6. Was bedeutet eine Besetzungsinversion? Warum benötigt man diese?

## **10 Praktischer Teil**

# 10.1 Versuch: Beobachtung von Newton'schen Ringen auf der Oberfläche von Objektträgern

#### Versuchsdurchführung

- Erforderliches Material: zwei Objektträger
- Legen Sie die beiden Objektträger übereinander und halten diese in der Hand.
- Drehen Sie die beiden Objektträger so, dass sich das Licht der Deckenbeleuchtung darin spiegelt und die Newton'schen Ringe erkennbar werden.
- Mit einem Kugelschreiber (nicht mit der Mine) oder Ähnlichem können sie nun Druck auf die Glasplatten ausüben und dabei beobachten, wie sich die farbigen Ringe verändern.

# 10.2 Vorführversuch: Beugung und Interferenz mit einem He-Ne-Laser

#### Versuchsaufbau

Erforderliches Material:

- Versuchsaufbau mit He-Ne-Laser und Aufweitoptik
- Schirm
- Blende mit 4 Doppelspalten
- Blende mit 3 Einfachspalten

Die Abbildung 10-3 zeigt die Versuchsanordnung, um Interferenz und Beugung am Doppelund Einzelspalt (siehe Abbildungen 10-1 und 10-2) zu demonstrieren. Als Lichtquelle wird ein Helium-Neon-Laser verwendet. Durch eine Aufweitungsoptik, bestehend aus zwei Sammellinsen (Kepler-Fernrohr), wird der Laserstrahl nach der Beugung aufgeweitet und dann auf dem Schirm abgebildet.



PHYWE 08522.00 D 0.1 0.2 0.4

Abb. 10-1 Blende mit Doppelspaltanordnung

Abb. 10-2 Blende mit Einfachspalten



Abb. 10-3 Versuchsanordnung für Spalt- und Doppelspaltversuch

#### Versuchsdurchführung

- Schalten Sie den Laser ein.
- Fixieren Sie zunächst die Blende mit den Doppelspalten im Objektträger. Justieren Sie diese so, dass der Laserstrahl auf den Doppelspalt mit b = 0,2 mm Spaltabstand trifft. Beobachten Sie das Muster auf dem Schirm.
- Wiederholen Sie diesen Vorgang für die anderen drei Doppelspalte.
- Was stellen Sie fest, wenn beim Doppelspalt die Spaltbreite bzw. der Abstand zwischen den Spalten größer wird?
- Wechseln Sie die Doppelspalt-Blende gegen die Blende mit den Einfachspalten aus. Beobachten Sie auch hier alle entstehenden Muster.
- Welche Aussage kann bei der Vergrößerung der Spaltbreite beim Einzelspalt getroffen werden?

# 10.3 Vorführversuch: Demonstration am Michelson-Interferometer und Ermitteln der Wellenlänge des Lasers

#### Versuchsaufbau

In Abbildung 10-4 ist der Aufbau des Michelson-Interferometers dargestellt. Die hier zu erwartenden Interferenzmuster werden auch mit einem He-Ne-Laser erzeugt.



Abb. 10-4 Versuchsaufbau Michelson-Interferometer

#### Versuchsdurchführung

- Versuchen Sie verschiedene Interferenzmuster, d.h. Interferenzstreifen und Interferenzringe, zu erzeugen.
- Berechnen Sie mithilfe der Versuchsanordnung die Wellenlänge des He-Ne-Lasers.
- Was könnten die Ursachen für eventuelle Abweichungen von der vom Hersteller angegebenen Wellenlänge sein?