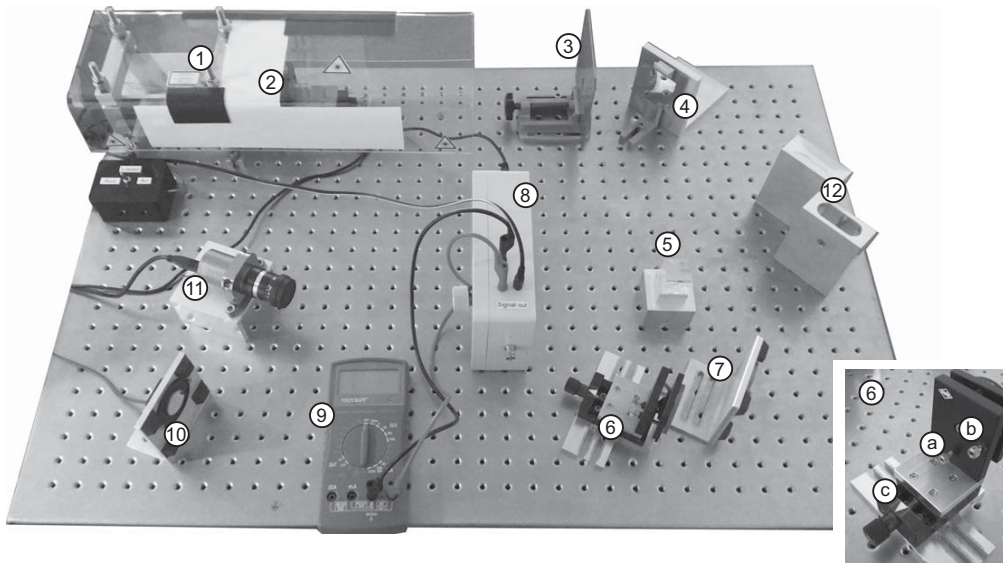


1 Interferometrie

Die Interferometrie ist ein Messverfahren, welches allgemein auf der Interferenz von Wellen beruht. In diesem Versuch können Sie den wichtigen Fall optischer Interferometrie und deren Einsatzmöglichkeiten kennen lernen. Dabei werden Sie feststellen, dass es sich hierbei um ein hochempfindliches Messverfahren handelt.



- | | | |
|--------------------------------------|--|--|
| ① Laser | ⑤ Strahlteiler | ⑧ aktiver Beobachtungsschirm |
| ② Raumfilter | ⑥ justierbarer Spiegel:
a Verkippung vertikal
b Verkippung horizontal
c Lineartisch | ⑨ Multimeter |
| ③ Sammellinse | ⑦ Spiegel (nicht justierbar) | ⑩ Lautsprecher mit Spiegel |
| ④ Umlenkspiegel | | ⑪ Digital-Kamera |
| Hier bitte nichts verändern ! | | |
| | | ⑫ Alu-Körper (Vorsicht: starke Haftmagnete!) |

1.1 Einleitung

Die optische Interferometrie ist ein Messverfahren, das sich die Wellennatur des Lichtes zunutze macht. Die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes liegt im Bereich von etwa 350 nm (Blau) bis etwa 700 nm (Rot). Die Auflösung interferometrischer Messapparaturen ist daher grundsätzlich besser als $1 \mu\text{m}$ (1000 nm). Mit Hilfe der Interferometrie kann man so z.B. kleinste Formveränderungen von Werkstücken detektieren und diese auch quantifizieren. Eine bekannte Anwendung ist zum Beispiel die Schwingungsanalyse von Karosserieteilen in der Automobilindustrie.

In diesem Praktikums-Experiment soll in zwei Schritten ein näherer Einblick in diese Technik vermittelt werden:

Zum Verständnis der Grundlagen soll zunächst ein einfaches *Michelson-Interferometer*

aufgebaut und ausprobiert werden. Dabei sollte anschaulich deutlich werden, wie hochgenaue Längenmessungen, sowohl im statischen wie auch im dynamischen Fall, interferometrisch möglich sind. Anschließend erfolgt der Umbau zu einem sog. *Speckle-Interferometer*, mit welchem anwendungsnahe Deformationsmessungen demonstriert werden sollen. Hierbei muss auf rechnerunterstützte Bildverarbeitung zurückgegriffen werden.

1.2 Physikalische Grundlagen

1.2.1 Was ist Interferenz?

Interferenzphänomene treten stets im Zusammenhang mit Wellen auf, und zwar unabhängig davon, welcher physikalischer Natur die Wellen sind. So beobachtet man Interferenz nicht nur bei elektromagnetischen Wellen (wozu auch sichtbares Licht gehört), sondern auch bei mechanischen Wellen, wie z.B. Schallwellen oder Wasserwellen. Insbesondere bei Wasserwellen ist Interferenz sehr anschaulich vorstellbar. Überlagern sich Wasserwellen, so entsteht eine neue Struktur der Wellenbewegung, mit Bereichen starker Wellenauslenkung und Bereichen, in denen keine oder nur sehr schwache Wellenauslenkung stattfindet. Das Zustandekommen der neuen Wellenstruktur kann leicht erklärt werden: Treffen beispielsweise zwei Wellenberge zusammen, so werden sie sich zu einem noch höheren Berg auftürmen, was gewissermaßen einer Verstärkung entspricht. Bei zwei Wellentälern passiert genau das gleiche, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen, d.h. das Tal wird noch tiefer. Treffen sich aber ein Berg und ein Tal, dann wird letzteres quasi durch den Berg aufgefüllt, die beiden löschen sich also gegenseitig aus.

Um Interferenz mathematisch zu beschreiben benötigt man zuerst einen Ansatz für die einzelne Welle. Im Falle von Licht (oder allgemein elektromagnetischen Wellen) macht man folgenden Ansatz einer ebenen Welle für die elektrische Feldstärke $\vec{E}(\vec{r}, t, \phi)$ (vorzugsweise in komplexer Schreibweise):

$$\vec{E}(\vec{r}, t, \phi) = \vec{E}_0 \cdot \exp \left[i \left(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t + \phi \right) \right]. \quad (1.1)$$

Für die mit einem Detektor messbare Lichtintensität dieser Welle erhält man:

$$I = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \left| \vec{E}(\vec{r}, t, \phi) \right|^2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2 \quad \text{mit} \quad E_0 = \left| \vec{E}_0 \right| \quad (1.2)$$

Wir wollen nun damit die Interferenz zweier kohärenter Wellen beschreiben, die sich mit gleicher Amplitude (und auch gleicher Polarisationsrichtung) entlang derselben Richtung des Wellenvektors \vec{k} ausbreiten. Kohärenz bedeutet, dass die beiden Wellen den gleichen Wellenvektorbetrag bzw. die gleiche Frequenz und eine feste Phasenbeziehung zueinander besitzen. Lediglich die absolute Phasenlage der beiden Wellen kann sich unterscheiden. Die Addition der elektrischen Felder beider Wellen führt uns zur Interferenz:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{gesamt}}(\vec{r}, t, \phi_1, \phi_2) &= \vec{E}_1(\vec{r}, t, \phi_1) + \vec{E}_2(\vec{r}, t, \phi_2) = \\ &= \vec{E}_0 \cdot \exp \left[i \left(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t + \phi_1 \right) \right] + \vec{E}_0 \cdot \exp \left[i \left(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t + \phi_2 \right) \right] = \\ &= \vec{E}_0 \cdot \exp \left[i \left(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t + \phi_1 \right) \right] \cdot \left(1 + \exp \left[i \left(\phi_2 - \phi_1 \right) \right] \right) \end{aligned} \quad (1.3)$$

Für die Intensität der überlagerten Wellen ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} I_{\text{gesamt}} &= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \left| \vec{E}_{\text{gesamt}}(\vec{r}, t, \phi_1, \phi_2) \right|^2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2 \cdot \left| 1 + \exp \left[i \left(\phi_2 - \phi_1 \right) \right] \right|^2 = \\ &= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2 \cdot 2 \cdot \left(1 + \cos \phi_{21} \right) \quad \text{mit} \quad \phi_{21} = \phi_2 - \phi_1 \end{aligned} \quad (1.4)$$

Man erhält also einen stationären (zeitunabhängigen) Interferenzterm, der nur vom Phasenunterschied ϕ_{21} zwischen beiden Wellen abhängt. Beträgt der Phasenunterschied ein ungerades Ganzzahliges von π ($\dots, -3\pi, -\pi, \pi, 3\pi, \dots$), so führt dies zu *destruktiver Interferenz* (Interferenzminimum) und für die Intensität gilt $I_{\text{gesamt}} = 0$. Beträgt der Phasenunterschied jedoch ein gerades Ganzzahliges von π ($\dots, -2\pi, 0, 2\pi, \dots$), so ergibt sich *konstruktive Interferenz* (Interferenzmaximum) und für die Intensität erhält man $I_{\text{gesamt}} = 4 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2$. In diesem Fall ist die Intensität der überlagerten Wellen also viermal so groß wie die Einzelintensität (und nicht doppelt so groß, wie man es erwarten würde, wenn man statt der elektrischen Felder die Intensitäten addieren würde).

Anmerkung: Interferenz tritt natürlich auch bei nicht kohärenten Wellen auf, da sich (im Falle elektromagnetischer Wellen) die elektrischen Felder von zwei Wellen immer zu einer Gesamtfeldstärke addieren. Allerdings ist der Interferenzterm dann nicht stationär. Dies bedeutet, dass sich Interferenzminima und -maxima in schneller Folge abwechseln, für den Beobachter mittelt sich der Interferenzeffekt zeitlich weg. Die so entstehende Gesamtintensität erhält man dann einfach wieder durch Addition der Einzelintensitäten.

1.2.2 Räumliche Interferenzmuster

Bei der Interferenz zweier ebener, kohärenter Wellen, die sich parallel entlang einer Richtung ausbreiten, erhält man auf einem Beobachtungsschirm eine einheitliche, mehr oder weniger hohe Lichtintensität. Wie oben gezeigt hängt die Intensität nur von der Phasendifferenz zwischen beiden Wellen ab. In der Praxis ist dieser Fall aber nur sehr schwer oder zumindest nur mit erhöhtem Aufwand realisierbar. In den meisten Fällen kommt es zu Abweichungen davon, da man es nicht mit ideal ebenen Wellen zu tun hat bzw. die Wellen nicht perfekt parallel zueinander ausgerichtet sind. Dies führt dazu, dass sich

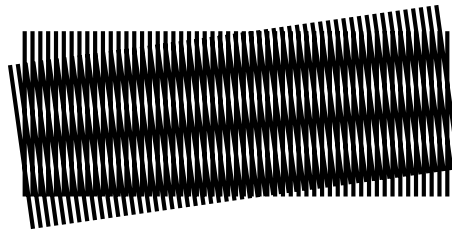


Abbildung 1.1: Schema der Überlagerung zweier ebener Wellen. Die schwarzen Balken stellen die Wellenfronten dar, die Ausbreitungsrichtung ist senkrecht zu diesen. (Eine Wellenlänge würde hier dem Abstand zwischen einem Balken und seinem übernächsten Nachbarn entsprechen. Deutlich zu erkennen ist das sich ergebende Interferenzmuster. Die dunklen Bereiche stellen hier abwechselnd Maxima und Minima dar.)

über den Strahlquerschnitt unterschiedliche Phasendifferenzen zwischen den beiden Wellen ergeben, auf einem Beobachtungsschirm erhält man dann ein Interferenzmuster, d.h. eine Abfolge von benachbarten Interferenzmaxima und -minima. Wenn zum Beispiel zwei ebene Wellen etwas verkippert zueinander auf den Schirm treffen, so ergibt sich am Schirm eine Phasendifferenz ϕ_{21} , die sich entlang des Schirms linear ändert. Wegen Gleichung 1.4 sollte dann die Intensität cosinusförmig entlang der Verkippungsrichtung moduliert sein. Das Zustandekommen der Interferenzmuster kann man sich anschaulich klar machen, indem man einfache Streifenmuster, die die jeweilige Welle darstellen, überlagert. Da man daraus aber keine wirkliche konstruktive bzw. destruktive Interferenz ablesen kann, ist

dies jedoch nur als vereinfachtes Anschauungsmodell zu sehen. Der Fall zweier (idealer) ebener Wellen, die unter einem gewissen Winkel zueinander verlaufen, ist in Abbildung 1.1 zu sehen. Man kann sich leicht vorstellen, dass auf einem Beobachtungsschirm ein regelmäßiges Muster aus hellen und dunklen Streifen entsteht, welche senkrecht zur Zeichenebene orientiert sind.

Den Fall, dass eine ebene Welle von einer divergenten Welle (mit kugelförmiger Wellenfront) überlagert wird, kann in Abbildung 1.2 betrachtet werden. Man kann sich vorstellen, dass auf einem Beobachtungsschirm ein konzentrisches Ringsystem aus abwechselnd hellen und dunklen Bereichen entsteht.

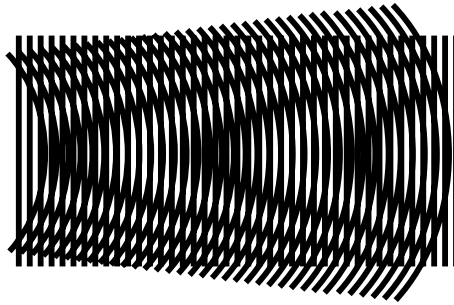


Abbildung 1.2: Schema der Überlagerung zweier Wellen mit ebener und gekrümmter Wellenfront.

Am Praktikumsplatz liegen Transparentfolien mit entsprechenden Streifenmustern aus. Damit können Sie sich den geschilderten Sachverhalt nochmals vor Augen führen.

1.2.3 Interferometrische Messverfahren

Wie im Abschnitt 1.2.1 gezeigt wurde, können bei der Interferenz zweier kohärenter Wellen Interferenzmaxima bzw. -minima entstehen. Um aus einem Maximum ein Minimum zu erzeugen (bzw. umgekehrt) muss sich der Phasenunterschied ϕ_{21} zwischen den beiden Wellen um $\Delta\phi_{21} = \pi$ ändern. Dies kann zum Beispiel dadurch erreicht werden, dass man die Laufstrecke einer der beiden Wellen um $\Delta x = \frac{\Delta\phi_{21}}{2\pi} \cdot \lambda = \frac{\lambda}{2}$ vergrößert oder verringert. Es liegt nahe, dieses Prinzip für Weglängenmessungen heranzuziehen. Da bei sichtbarem Licht für die Wellenlänge $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$ gilt, wird deutlich, dass mit optischer Interferometrie hochpräzise Längenmessungen möglich sind.

Ein bekannter Interferometrie-Aufbau ist das Michelson-Interferometer. Hier werden zwei zueinander kohärente Lichtwellen erzeugt, indem man ein primäres Lichtbündel durch einen Strahlteiler (halbdurchlässiger Spiegel) in zwei Teilbündel aufteilt¹. Um eine hinreichend große Kohärenzlänge zu haben, wird als Lichtquelle in der Regel ein Laser verwendet. Die beiden Teilwellen werden jeweils über einen Umlenkspiegel zum Strahlteiler zurückreflektiert, von wo aus sie überlagert zum Beobachtungsschirm geleitet werden². Eine der beiden Teilwellen dient dabei als Referenz, deren Phase unverändert bleibt. Die andere Teilwelle wird als Mess-Welle verwendet, die in einer Phasenverschiebung den zu messenden Effekt trägt. Der Messeffekt kann zum Beispiel darin bestehen, dass der zugehörige Umlenkspiegel verschoben wird.

¹In anderen Bereichen ist es oft einfacher zwei zueinander kohärente Wellen zu erzeugen. Bei Schallwellen muss man z.B. nur zwei Lautsprecher an denselben Verstärkerausgang anschließen, bei Radio-Wellen entsprechend zwei Antennen an denselben Senderausgang.

²Präziser ausgedrückt wird jeweils nur die halbe Wellenamplitude zum Schirm geführt, der restliche Teil wird zum Laser zurückreflektiert.

1.3 Die experimentelle Anordnung

Ihnen stehen für dieses Experiment eine Reihe von zum Teil teureren optischen Komponenten zur Verfügung. Bitte behandeln Sie diese pfleglich, d.h. fassen Sie sie nur an den Metallsockeln an, nicht an den optischen Flächen. Bereits montiert sind die ersten drei

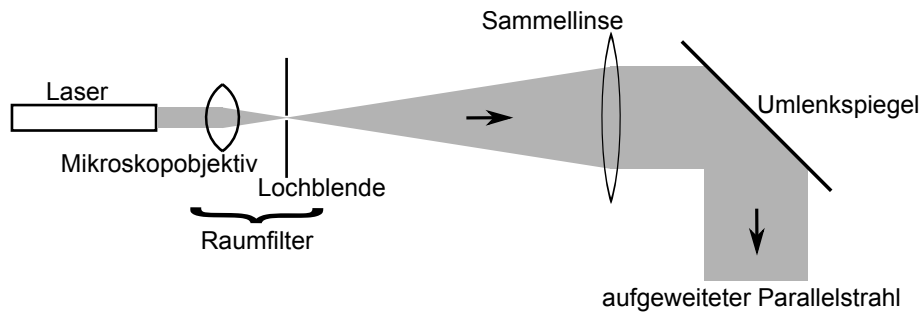


Abbildung 1.3: Schematischer Strahlengang durch die Laseroptik.

Komponenten nach dem Laser: Das *Raumfiltersystem*³ (bestehend aus einem Mikroskopobjektiv und einer Lochblende), eine *Sammellinse* zur Parallelisierung des Laserstrahls und ein *Umlenkspiegel*. Diese Komponenten sind bereits justiert und dürfen nicht verändert werden! Insgesamt liefert Ihnen diese Anordnung einen Laser-Parallelstrahl mit einem Durchmesser von 20 mm. Sollte dies nicht der Fall sein, so verständigen Sie bitte den Betreuer.

Belehrung zum Laserschutz

Bei diesem Experiment wird ein Dioden-Laser (Wellenlänge: 532 nm) der Klasse 2 mit einer Gesamtleistung von max. 1 mW eingesetzt⁴. Bei dieser Laserklasse wird davon ausgegangen, dass das Auge (im Normalfall) durch den natürlichen Lidschlussreflex hinreichend geschützt sein sollte. Das grüne Laserlicht hat den Vorteil, dass das menschliche Auge für grünes Licht deutlich empfindlicher als z.B. für rotes Licht ist. So kommt man mit geringeren Lichtleistungen (und damit geringerem Gefährdungspotential) aus und erzielt trotzdem eine ausreichende Helligkeit. Beim vorliegenden Aufbau kommt hinzu, dass der Strahl in der Regel auf 20 mm aufgeweitet ist. So ist die Lichtleistung pro Fläche nochmal deutlich reduziert, wodurch sich das Gefährdungspotential weiter einschränkt.

Dennoch gilt beim Umgang mit Laserstrahlung grundsätzlich: Laserstrahlung stellt für das Auge ein Gefahrenpotential dar. Bei direktem Blick in den Strahlengang, auch in den aufgeweiteten Strahlengang, können Netzhautverbrennungen auftreten⁵. Schäden, die durch Laserstrahlung am Auge entstehen, sind in der Regel irreparabel.

Beachten Sie daher beim Experimentieren folgende Regeln:

³Durch den Raumfilter entsteht ein homogener aufgeweiteter Strahl ohne störende Strukturen, die insbesondere aufgrund von Beugungseffekten an Verunreinigungen der optischen Komponenten entstehen können.

⁴In diese Klasse fallen auch handelsübliche, für Präsentationszwecke zugelassene Laserpointer.

⁵Bei starken Lasern (z.B. Argon-Ionen-Laser) kann sogar schon der Blick in das an Oberflächen diffus gestreute Laserlicht gefährlich sein.

Niemals direkt in den Strahl blicken! Vermeiden Sie es ebenfalls, den Strahl beim Hantieren unkontrolliert in unbeabsichtigte Richtungen abzulenken. Es ist aus diesem Grund auch durchaus ratsam, Schmuck und Uhren von den Händen zu entfernen.

1.4 Aufgaben

1.4.1 Michelson–Interferometer

Der Dioden–Laser besitzt eine Aufwärmzeit von max. 15 min. Schalten Sie daher den Laser gleich ganz zu Beginn ein. Die ersten Messaufgaben werden mit Hilfe eines Michelson–Interferometers durchgeführt. Bauen Sie diese Anordnung gemäß Abbildung 1.4 auf.

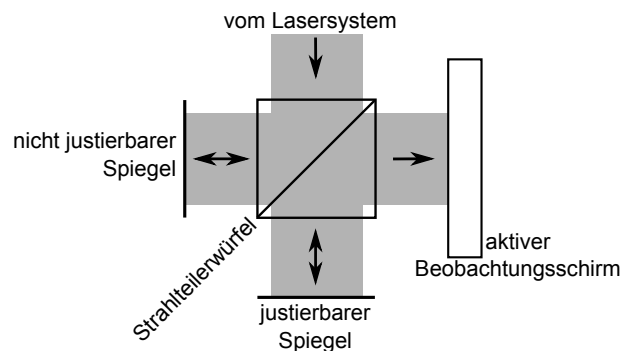


Abbildung 1.4: Aufbau des Michelson–Interferometers.

Wichtig: Fixieren Sie beide Spiegel mit jeweils mindestens einer Schraube auf der Experimentierplatte! (Schrauben bitte nicht zu fest anziehen!)

Wenn Sie alles richtig gemacht (und etwas Glück) haben, sollten Sie nun viele Interferenzstreifen auf dem Schirm beobachten können. Die Anzahl der Streifen ist vom Winkel abhängig, den die beiden überlagerten Strahlbündel miteinander einschließen. Die Anzahl wächst dabei mit zunehmendem Winkel. Ist der Winkel zwischen den beiden Bündeln zu groß, dann liegen die Streifen jedoch so dicht beieinander, dass man sie nicht erkennen kann. Versuchen Sie in diesem Fall durch Kippen des justierbaren Spiegels mit Hilfe der Einstellschrauben ein sichtbares Interferenzmuster zu bekommen.

(Hinweis zur systematischen Vorgehensweise: Auf der dem Laser abgewandten Seite der Lochblende (des Raumfilters) können Sie die Fokuspunkte der beiden Teilstrahlen sehen, die ja zur Hälfte vom Strahlteiler zurückreflektiert werden. Diese beiden Fokuspunkte müssen Sie zur Deckung bringen. Wenn es gar nicht klappen will, lassen Sie sich von Ihrem Betreuer helfen.)

Sie können den Winkel und damit die Zahl der Interferenzstreifen mit den beiden Einstellschrauben des justierbaren Spiegels variieren. Für den Fall, dass beide Bündel exakt parallel sind, sollte sich theoretisch eine einheitliche, mehr oder weniger helle Fläche ohne Streifen ergeben. Dies gilt aber nur für absolut ebene Wellenfronten. Im Experiment hat man es in der Regel immer mit leicht verzerrten Wellenfronten zu tun. Hauptursache hierfür sind „Fehler“ der optischen Elemente im Strahlengang, also zum Beispiel

des Strahlteilers und der Spiegel. Sind die Spiegel nicht absolut plan, dann verzerren sie unweigerlich die Wellenfront. Das Ergebnis ist damit also keine einheitlich helle oder dunkle Fläche, sondern ein Interferenzmuster mit bestenfalls maximalen Abständen zwischen hellen und dunklen Bereichen. Versuchen Sie den Spiegel so einzustellen, dass Sie möglichst wenige Streifen bzw. Ringe sehen.

Aufgabe 1 – Qualitative Untersuchungen Versuchen Sie ein Gefühl dafür zu bekommen, wie leicht das Interferenzmuster beeinflusst werden kann. Drücken Sie nacheinander leicht gegen den Halter des justierbaren bzw. nicht–justierbaren Spiegels, gegen die Halterung des Strahlteilers sowie direkt auf die Experiment–Grundplatte. Wie reagiert das Interferenzmuster? Wie sollte man sich daher grundsätzlich bei optischen Interferenzexperimenten verhalten?

Lassen Sie etwas Feuerzeuggas (ohne Flamme) in einen der beiden Teilstrahlengänge strömen. Was beobachten Sie? Können Sie die Beobachtung erklären?

Kippen Sie den justierbaren Spiegel so, dass Sie einige wenige Streifen am Schirm erhalten. Wenn Sie nun langsam am Einstellknopf des Lineartisches drehen, so sollten Sie eine (mehr oder weniger schnelle) Abfolge von sich abwechselnden Intensitätsmaxima und Intensitätsminima beobachten können.

Überlegen Sie: Wie weit (in Einheiten der Lichtwellenlänge) muss der Tisch verschoben werden, wenn aus einem Maximum ein Minimum und dann wieder ein Maximum auf dem Schirm werden soll? Betrachten Sie dazu den kompletten Weg, den das Licht bis zum Schirm zurücklegen muss.

Wenn Sie den Tisch im Bereich eines oder mehrerer Millimeter verschieben, werden Sie evtl. sehen, dass sich der Kontrast zwischen Maxima und Minima periodisch verschlechtert und verbessert.⁶ Stellen Sie den Tisch so ein, dass Sie einen möglichst hohen Kontrast erhalten.

Aufgabe 2 – Intensitätsmessungen Nun soll der aktive Beobachtungsschirm verwendet werden, um an einer Stelle des Interferenzmusters die Intensität zu messen. Dazu besitzt der Schirm ungefähr auf Höhe der Strahlmitte eine Öffnung (Durchmesser 1,5 mm), hinter der sich ein Lichtsensor (Phototransistor) befindet. Die Ausgangsspannung des Phototransistors mit nachgeschalteter Verstärkung ist direkt proportional zur detektierten Lichtintensität und nimmt (je nach eingestellter Verstärkung) einen Wert zwischen 0 V und maximal ungefähr 14 V an. (Bei einer Spannung von 14 V ist die maximal detektierbare Lichtintensität erreicht). Da der Lichtsensor sehr empfindlich darauf reagiert, unter welchem Winkel der Strahl einfällt, achten Sie bitte darauf, dass der Einfall stets senkrecht erfolgt. Verändern Sie auch während einer Messreihe die Position und Stellung des aktiven Beobachtungsschirms nicht, da dies Einfluss auf die Messergebnisse hat. Stellen Sie den Beobachtungsschirm so auf, dass Sie möglichst in der Mitte des Lichtflecks die Intensität detektieren können. Schließen Sie (falls nicht schon der Fall) das Multimeter (DC–Messbereich) an und messen Sie die Spannung. Bevor wir mit den eigentlichen Messungen beginnen soll die Verstärkung des Signals noch folgendermaßen eingestellt werden:

Unterbrechen Sie einen der beiden Teilwege (Sie können bestimmen welchen) des Laserstrahls im Interferometer und drehen die Verstärkung (auf der Rückseite des Schirms) soweit hoch bzw. zurück, dass die Spannung möglichst genau 0,50 V beträgt. Während der folgenden Messungen darf die Verstärkung dann natürlich nicht mehr verändert wer-

⁶Dies wird dadurch verursacht, dass der Laser evtl. nicht nur eine, sondern mehrere Lasermoden ausstrahlt. Jede Mode erzeugt ein eigenes Interferenzmuster, deren Intensitäten sich überlagern.

den!

Justieren Sie den Spiegel so, dass Sie wieder möglichst breite Maxima- bzw. Minima haben und messen dann folgende Ausgangsspannungen unter den jeweils nebenstehenden Mess-Bedingungen:

- U_1 : Strahlengang zum justierbaren Spiegel unterbrochen
- U_2 : Strahlengang zum nicht-justierbaren Spiegel unterbrochen
- U_{\max} : Photodetektor im Interferenzmaximum (Tipp: Drücken Sie mit einem Finger auf die Grundplatte in der Nähe der Spiegel bis sich ein Maximum dort befindet wo der Sensor ist.)
- $U_{\min-\max-\text{gemittelt}}$: Verkippen Sie den justierbaren Spiegel soweit, dass das Interferenzmuster nicht mehr erkennbar ist.

Berechnen Sie nun zunächst das Strahlteilverhältnis U_1/U_2 sowie die mittlere Einzelintensität⁷ $U_{\text{einzel}} = (U_1 + U_2)/2$.

Berechnen Sie damit das **physikalisch wichtige** und interessante Verhältnis der Intensität im Maximum zur Einzelintensität $U_{\max}/U_{\text{einzel}}$. Deckt sich das Messergebnis mit der theoretischen Erwartung?

Berechnen Sie nun noch das Verhältnis der über Maxima und Minima gemittelten Intensität zur Einzelintensität $U_{\min-\max-\text{gemittelt}}/U_{\text{einzel}}$.

Aufgabe 3 – Hochgenaue Längenmessung Bei dieser Messaufgabe soll demonstriert werden, wie mit Interferometrie hochpräzise Längenmessungen bzw. Positionierungen möglich sind. Dazu soll mit dem Lineartisch der justierbare Spiegel um $10\ \mu\text{m}$ (gemäß Skala am Drehknopf) verschoben und der genaue Verschiebungsweg interferometrisch durch Auszählen der durchlaufenen Interferenzmaxima (bzw. -minima) bestimmt werden. Stellen Sie dazu den justierbaren Spiegel wieder so ein, dass das Interferenzmuster möglichst wenige Streifen enthält.

Das Mitzählen der Intensitätsmaxima per Auge stellt hier kein zuverlässiges Verfahren mehr dar. Daher wird bei dieser Messung der Intensitätsverlauf am Detektor des Schirms mit einem sogenannten Datenlogger aufgezeichnet⁸. Starten Sie das Programm *PicoScope* auf dem Praktikumsrechner, stellen Sie in der Menüzeile als Zeitbasis $1\ \text{s/div}$ und als Anzahl der Samples $10\ \text{kS}$ ein. Nun können Sie das Spannungssignal (das Sie bis jetzt mit dem Multimeter gemessen haben) über der Zeit fortlaufend aufzeichnen. Das Programm sollte weitgehend selbsterklärend sein, wir verwenden nur die Start-, Stop- und die Zoomfunktion.

Machen Sie sich zunächst kurz mit der Datenaufzeichnung vertraut, indem Sie z.B. den Laserstrahl mit der Hand kurz unterbrechen.

Hinweise zur praktischen Vorgehensweise: Die Striche auf dem Drehknopf des Tisches bedeuten eine Einteilung in $\frac{1}{100}\text{mm}$. Bedenken Sie, dass die Spindel des Tisches eventuell ein gewisses Spiel aufweist, das heißt, Sie sollten bei der Messung in derselben Richtung drehen, in der Sie unmittelbar vorher gedreht haben. Falls Sie Probleme haben, die Skala gut ablesen zu können, so können Sie die bereit liegende Lupe verwenden. Koordinieren Sie sich mit Ihrem Teamkollegen, d.h. einer dreht am Tisch, der andere bedient die Software.

⁷Natürlich sind die gemessene Spannung und die Lichtintensität unterschiedliche Größen. Da die Spannung aber direkt proportional zur Intensität ist und wir letztlich nur an den Verhältnissen interessiert sind, kann man als Maß für die Intensität hier direkt die Spannung angeben.

⁸Ein Datenlogger erfüllt eine ähnliche Aufgabe wie ein digitales Speicheroszilloskop.

Zur Auswertung zählen Sie in der Aufzeichnung die Zahl der durchlaufenen Maxima bzw. Minima. Berechnen Sie damit und mit Hilfe der Laser-Lichtwellenlänge wie weit Sie den Spiegel verschoben haben (erinnern Sie sich an Aufgabe 1). Wie groß ist die Abweichung von den geplanten $10\ \mu\text{m}$?

Aufgabe 4 – Schwingungsmessung Die Messung von Verschiebungen, die Sie im vorigen Versuch kennengelernt haben, ist prinzipiell natürlich nicht auf statische bzw. langsame Vorgänge beschränkt. Es lassen sich damit zum Beispiel auch Vibrationen analysieren. Ersetzen Sie dazu den nicht justierbaren Spiegel im Michelson-Interferometer durch den Lautsprecher mit aufgeklebtem Spiegel und stellen Sie wieder ein Interferenzmuster ein, welches möglichst wenige Streifen aufweist. Der Lautsprecher ist an einen Funktionsgenerator angeschlossen, welcher definierte Schwingungssignale erzeugen kann.

Stellen Sie den Funktionsgenerator auf Sinus-Signal und die Frequenz auf 1 Hz. Drehen Sie die Amplitude hoch und wieder zurück. Was beobachten Sie (per Auge) am Schirm? Erhöhen Sie nun die Frequenz am Funktionsgenerator auf 100 Hz und stellen Sie die Amplitude auf einen mittleren Wert ein. Das per Auge sichtbare Interferenzmuster sollte nun verschwinden. Um mit dem Datenlogger das Signal darstellen zu können, gehen Sie zunächst auf die Ausgangseinstellung (Haussymbol in der Menüleiste) und stellen dann $2\ \text{ms/div}$ und wieder $10\ \text{kS}$ ein. Zeichnen Sie mit dem Datenlogger den Spannungsverlauf auf und variieren dabei langsam die Amplitude am Funktionsgenerator. Stoppen Sie die Aufnahme wenn Sie einen Verlauf von vielen, aber noch gut abzählbaren Minima und Maxima erkennen. Können Sie die entstandene Kurvenform erklären? Ermitteln Sie quantitativ, wie weit der Lautsprecher-Spiegel insgesamt hin- und herschwingt und wie groß die Momentangeschwindigkeit des Spiegels am Schwingungsnulldurchgang ist.

1.4.2 Speckle-Interferometrie

Alle bisher untersuchten Messverfahren hatten die Einschränkung, dass die beiden Teilstrahlen im Interferometer mit Spiegeln zurückreflektiert wurden. In der Praxis kann aber der Fall auftreten, dass es nicht möglich oder sinnvoll ist, auf dem Messobjekt einen Spiegel anzubringen. Eine Lösung bietet hier die sogenannte Speckle-Interferometrie, bei der man nicht mit reflektierten, ebenen Lichtwellen arbeitet, sondern mit dem von Oberflächen diffus gestreuten Licht.

Bauen Sie das Michelson-Interferometer zu einem Speckle-Interferometer um, indem Sie den justierbaren Spiegel durch den verformbaren Alu-Körper (mit der Flügelmutter auf der strahlabgewandten Seite) und den nicht justierbaren Spiegel durch den nicht verformbaren Alu-Körper ersetzen.

Achtung: Die beiden Alukörper haben auf der Unterseite starke Haftmagnete!

Da das Licht an den Alu-Körpern diffus gestreut wird, entsteht natürlich kein gerichteter Strahlengang zum Beobachtungsschirm mehr. Beim Speckle-Interferometer wird der Beobachtungsschirm durch die Digital-Kamera ersetzt, die direkt in den Strahlteilerwürfel blickt. Die Kamera sieht dann die Interferenz des Lichtes vom deformierbaren Alu-Körper (Messobjekt) und vom nicht deformierbaren Alu-Körper (Referenzobjekt).

Aufgabe 5 – Speckle-Effekt Eventuell ist Ihnen auch früher schon aufgefallen, dass Oberflächen, die mit einem Laser beleuchtet werden, eine charakteristische gefleckte bzw. granulare Helligkeitsstruktur aufweisen (Speckle-Effekt).

Betrachten Sie den Speckle-Effekt auf einem der beiden Alu-Körper, variieren Sie dabei auch den Betrachtungswinkel. Falls Sie Brillenträger sind, beobachten Sie das Speckle-Muster auch ohne Brille. Sehen Sie das Speckle-Muster immer noch scharf?

Versuchen Sie sich klarzumachen, wie das Speckle-Muster genau entsteht (Hinweis: die Oberflächenrauigkeit ist entscheidend) und wie Sie Ihre Beobachtungen erklären können.

Aufgabe 6 – Speckle-Interferometrie Nehmen Sie als erstes die Digital-Kamera in Betrieb, indem Sie das Programm *AltairCapture* auf dem Rechner starten. Um bei diesem Experiment gute Ergebnisse zu erzielen, schieben Sie bitte beide Alublöcke direkt an den Aluhalter des Strahlteilers heran (ohne Lücke). Der Block mit der Schraube sollte so aufgestellt werden, dass der Schraubenkopf mit seinem Rand in den Laserfleck hineinragt. Richten Sie die Kamera so aus, dass die beiden überlagerten Lichtflecke auf den Alu-Körpern etwa in der Bildmitte liegen und das Bild weitgehend ausfüllen. Stellen Sie die Kamera auf die Oberfläche der Alu-Körper (zum Beispiel auf den Schraubenkopf) scharf indem Sie an dem vorderen Einstellring des Objektivs drehen⁹. Für eine passende Belichtung aktivieren Sie *Auto-Belichtung* und ziehen das Referenz-Rechteck in den entsprechenden Bildbereich.

Die Messprozedur besteht aus folgenden Schritten:

- Lockern Sie (falls notwendig) die Flügelmutter am verformbaren Alu-Körper und ziehen Sie sie ganz leicht an, damit die Schraube etwas geklemmt ist. Dies stellt den mechanischen Ausgangszustand dar. Nehmen Sie nun ein Bild mit der Digital-Kamera auf. Vermeiden Sie Erschütterungen des Aufbaus während der Aufnahme.
- Ziehen Sie nun die Flügelmutter etwas kräftiger an. Dadurch wird der Alu-Körper gequetscht. Nehmen Sie nun nochmals ein Bild auf. Führen Sie die bisher beschriebenen Schritte möglichst zügig durch, damit zwischen den beiden Kamerabildern keine zu lange Zeitdauer liegt.
- Speichern Sie beide Aufnahmen auf dem Desktop ab.
- Sie werden weder auf dem einen noch auf dem anderen Bild auswertbare Strukturen erkennen können. Trotzdem unterscheiden sich die beiden Bilder im jeweils aufgezeichneten Speckle-Muster. In diesem Unterschied ist die Verzerrung des deformierten Alu-Körpers enthalten. (Wenn Sie an das Michelson-Interferometer mit den Spiegeln zurückdenken, welche damalige Beobachtung ist analog zum Vergleichen der beiden Kamera-Bilder?) Um den Unterschied zwischen den beiden Speckle-Mustern (also den beiden Intensitätsverteilungen) herauszuextrahieren ist es am einfachsten, die beiden Bilder mit Bildverarbeitungssoftware voneinander zu subtrahieren¹⁰.
- Starten Sie das Grafik-Programm *Gimp*. Öffnen Sie das erste Bild normal, das zweite aber unter der Option *Als Ebenen öffnen*.
- Aktivieren Sie im Dialogfeld *Ebenen* als Modus die Option *Unterschied*.
- Betrachten Sie das Ergebnisbild. Wie interpretieren Sie das Bild?

⁹Der hintere Einstellring legt die Blendenöffnung fest welche durch Beugung wiederum die Speckle-Größe bestimmt (große Blendenzahl bedeutet kleine Öffnung und damit große Speckles). Die Blende sollte auf einem Wert zwischen 4 und 8 stehen.

¹⁰Ein digitales Bild stellt eine Matrix von Helligkeitswerten (für jedes Pixel ein Zahlenwert) dar, eventuell getrennt für jede der drei Farben bei einem Farbbild. Wenn man zwei Bilder voneinander subtrahiert, so werden pixelweise diese Helligkeitswerte voneinander subtrahiert

- Bestimmen Sie quantitativ, wie tief der Alu-Körper direkt neben der Schraube relativ zum Rand des Laser-Lichtflecks hineingedrückt wird.

Wichtiger Hinweis zum Verständnis: Durch die Subtraktion der beiden Kamera-Bilder wird kein neues physikalisches Messprinzip eingeführt! Das Grundprinzip der Messung ist beim Michelson-Interferometer und beim Speckle-Interferometer identisch. Während man jedoch im ersten Fall „globale“ Minima-Maxima-Strukturen erhält (die man dann für verschiedene Bedingungen auch unterscheiden kann), entstehen im zweiten Fall Speckle-Muster, deren Unterschied man nur mit Hilfe von Bildverarbeitung feststellen kann.