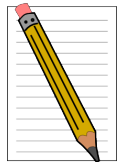


Michelson-Interferometer

Sie werden ein Michelson-Interferometer (MI) kennen lernen und justieren. Mit einem MI lassen sich Wegdifferenzen mit einer Genauigkeit in Nanometer-Bereich (10^{-9} m, im Bereich der Lichtwellenlänge λ) messen. Dies findet neben der vielleicht eindrucksvollsten wissenschaftlichen Anwendung im Gravitationswellendetektor LIGO auch andere, praktischere Anwendungen wie zum Beispiel bei der Verifizierung von finite-Element Berechnungen. Hier kann man die oft sehr kleinen Veränderungen in der Form eines Gegenstandes unter Belastung mit Interferometern genau bestimmen und so die Simulation verifizieren.

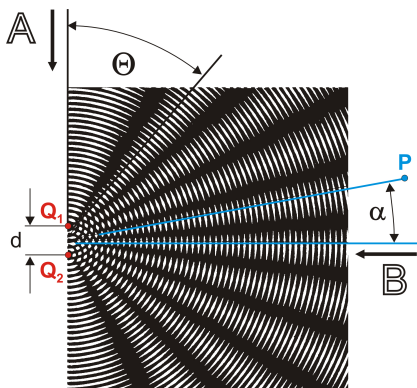
Schriftliche VORbereitung:

- (V1) Erklären Sie folgende Begriffe: Elektromagnetische Welle und deren Eigenschaften (Frequenz, Amplitude, Polarisation), Interferenz, Kohärenz und Michelson Interferometer.
- (V2) Was versteht man unter optischer Länge, im Unterschied zur geometrischen Länge?
- (V3) Erläutern Sie die Begriffe: destruktive und konstruktive Interferenz.
- (V4) Berechnen Sie die Intensität am Ausgang des Michelson-Interferometers in Abhängigkeit von der Phasendifferenz zwischen den Teilwellenzügen.
- (V5) Die beiden parallelen Strahlen 1' und 2' in Abb.1b löschen sich gegenseitig aus, wenn $\Delta\phi = \pi$ ist. Wie groß ist dann d ? Wie ist der Fall destruktive Interferenz mit dem Energieerhaltungssatz in Einklang zu bringen?
- (V6) Recherchieren Sie die Kohärenzlänge eines Helium-Neon-Lasers.

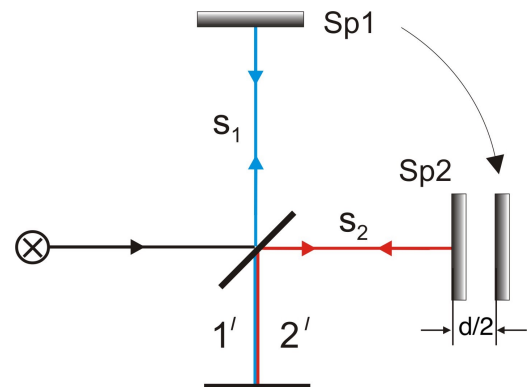


1 Grundlagen

Interferenz



(a) In der Beobachtungsrichtung B beträgt der Gangunterschied zwischen den interferierenden Wellenzügen nur wenige Wellenlängen.



(b) Strahlengang in einem MI

Abbildung 1: Darstellungen zur Interferenz

Bei Interferenzeffekten geht es um die Überlagerung von mehreren Wellen – In [Abbildung 1a](#) zum Beispiel werden zwei Radialwellen überlagert, die von den Quellen Q1 und Q2 ausgehen. Im Raum ergeben sich Bereiche, in denen sich die Wellen konstruktiv (gestreifte Bereiche) oder destruktiv (schwarze Bereiche) überlagern. Auch Lichtfelder, als elektromagnetische Welle, können interferieren – besonders eindrucksvoll ist dabei die Situation der destruktiven Interferenz, wenn aus der Überlagerung von Licht „Dunkelheit“ entsteht. Licht zeigt Interferenzphänomene allerdings nur, wenn die Lichtfelder kohärent überlagert werden – zwischen den überlagerten Feldern muss eine feste Phasenbeziehung bestehen. Im Versuch benutzen Sie eine Lichtquelle mit besonders guten Kohärenzeigenschaften (große Kohärenzzeit), einen Helium-Neon-Laser. Mathematisch kann der Amplitudenverlauf der elektromagnetischen Welle mit Hilfe von Sinus und Cosinus dargestellt werden. Für eine Orts- und Zeitdarstellung ergibt sich, o.B.d.A:

$$\mathcal{E}(t, \vec{r}) = \mathcal{E}_0 \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

Dabei ist ω die Kreisfrequenz des Lichts, \vec{k} der Wellenvektor und \vec{r} der Ortsvektor zu einem Punkt im Lichtfeld. Im Michelson-Interferometer wird eine ankommende elektromagnetische Welle in zwei Wellenzüge geteilt, die anschließend wieder überlagert werden (vgl. [Abbildung 1b](#)). Zum Beispiel durch eine ungleiche optische Weglänge ergibt sich bei der Überlagerung eine Phasenverschiebung ($\Delta\phi$) des einen Wellenzuges gegenüber des Anderen: Für \mathcal{E}_{ges} folgt somit:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{ges}}(t, \vec{r}) &= \mathcal{E}_1(t, \vec{r}) + \mathcal{E}_2(t, \vec{r}) \\ &= \frac{\mathcal{E}_0}{2} \left(\sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) + \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \Delta\phi) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Zwischen der Amplitude und der Intensität besteht bei kohärenter Überlagerung der Zusammenhang:

$$I_{\text{ges}} \propto |\langle \mathcal{E}_{\text{ges}}(t, \vec{r}) \rangle|^2 = |\langle \mathcal{E}_1(t, \vec{r}) + \mathcal{E}_2(t, \vec{r}) \rangle|^2 \quad (2)$$

Die Notation $\langle \dots \rangle$ meint dabei das Mittel über einige Perioden. Am Interferometerausgang ergibt sich schließlich die Intensität:

$$I_{\text{ges}} = I_0 (1 + \cos \Delta\phi) \quad \text{mit} \quad \Delta\phi = k(r_2 - r_1) \quad (3)$$

In Aufgabe (V4) zeigen Sie, wie Gleichung 3 aus Gleichung 1 und Gleichung 2 hervorgeht.

Die Phasenverschiebung

Die Phasenverschiebung kann daraus resultieren, dass die optischen Weglängen der Interferometerarme S_1 und S_2 nicht identisch sind – zum Beispiel, wenn ein Medium mit unterschiedlichem Brechungsindex in einen der Arme eingebracht wird. Im einfachsten Fall unterscheiden sich die geometrischen Armlängen, wie in der Abbildung 1b durch den Abstand d dargestellt.

Zu beachten ist hierbei, dass sich der geometrische Weglängenunterschied um den Abstand $2d$ verändert – logisch, sowohl Hin- als auch Rückweg müssen betrachtet werden. Dies führt dazu, dass Positionsänderungen des Spiegels im Bereich der halben Wellenlänge gemessen werden können – Sie werden bei der Versuchsdurchführung im Praktikum ein Messinstrument aufbauen mit dem Sie Weglängenänderungen mit einer Genauigkeit von 315 nm bestimmen können. Zum Vergleich: Ein menschliches Haar ist mit durchschnittlich $80 \text{ }\mu\text{m}$ etwa 250 mal so dick.

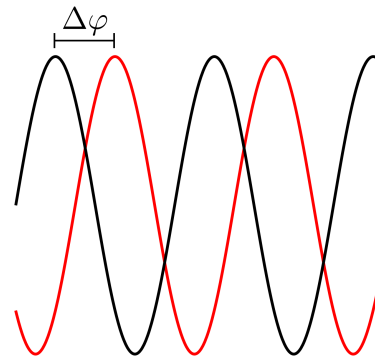


Abbildung 2: Die Phase der roten Welle ist gegenüber der schwarzen Welle um $\Delta\phi$ verschoben.

2 Experimente

In diesem Versuch werden Sie das Michelsoninterferometer als ein präzises Messwerkzeug kennenlernen. Sie werden es nutzen, um eine Mikrometerschraube und einen Piezostelltrieb zu charakterisieren.

2.1 Kennenlernen des MI

- (M1) Justieren Sie das MI mithilfe der [Hinweise zum Justieren des MI](#) so, dass ein Ringsystem am Interferometerausgang zu beobachten ist, welches im Zentrum einen Durchmesser von etwa 1,5 cm aufweist.
- (M2) Finden Sie experimentell heraus von welchem Parameter die Ausdehnung des Ringsystems abhängig ist.
- (M3) Genau genommen hat das Interferometer zwei Ausgänge: Identifizieren Sie den zweiten Ausgang und beschreiben Sie, wie sich dieser zum ersten verhält.

In der Auswertung bearbeiten Sie bitte die folgenden Aufgaben:

- (A1) Beschreiben Sie, wie das Ringmuster entsteht und welcher Parameter Einfluss auf die Ausdehnung hat, fertigen Sie hierzu auch eine Skizze an.
- (A2) Skizzieren Sie die Ringmuster beider Ausgänge; machen Sie dabei deutlich, wie sich beide Ringmuster zueinander verhalten; Nehmen Sie Bezug auf den Energieerhaltungssatz.

2.2 Charakterisierung einer Mikrometerschraube

Einer der Spiegel lässt sich mit einer Mikrometerschraube parallel verschieben. Beobachten Sie für die Messung das Zentrum des Kreisringsystems. Eine Periode entspricht einer Verschiebung um $\pm\lambda$, für N Perioden also $N \cdot \lambda = 2\Delta d$ ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$). Die erreichbare Genauigkeit hängt hauptsächlich von der Messunsicherheit der Längenänderung Δd ab. Sie fällt umso weniger ins Gewicht, je mehr Perioden N Sie zählen.

- (M4) Bestimmen Sie die Hell-Dunkel-Wechsel N jeweils fünf Mal für die Stellwege $\Delta d = 40 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m}$, $120 \mu\text{m}$, $160 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$.

In der Auswertung stellen Sie dann die mit dem Interferometer gemessene Weglängenänderung (Perioden N) der mit der Mikrometerschraube eingestellten Längenänderung (Δd) gegenüber:

- (A3) Tragen Sie $\langle N \rangle \cdot \lambda$ gegen $2\Delta d$ auf. $\langle N \rangle$ bezeichnet den Mittelwert. Fehlerbalken: Standardfehler $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$.
- (A4) Führen Sie eine Fitanalyse durch: $A \cdot x$ und interpretieren diese.

2.3 Charakterisierung des Piezo-Stelltriebs

Die Position des anderen Spiegels lässt sich mit einem piezoelektrischen Stelltrieb parallel verschieben. Zwischen Verstellweg $x = \frac{N}{2}\lambda$ und angelegter Spannung U sollte ein linearer Zusammenhang bestehen: $x = E \cdot U$ (Empfindlichkeit E).

(M5) Bestimmen Sie E bei zunehmender und bei abnehmender Spannung. Hierbei ist es zweckmäßig, die Spannung so lange zu variieren, bis sich die Weglänge genau um $\frac{\lambda}{2}$ geändert hat, das Interferenzmuster sich also genau wiederholt. Notieren Sie immer an diesen Stellen die Spannung U .

(A5) Überprüfen Sie mittels Firanalyse, ob sich die Längenänderung linear zur Piezospannung verhält.

(A6) Verhält sich der Piezostelltrieb bei der Messung mit ansteigender Piezospannung anders als bei der Messung mit abfallender Piezospannung (Hysterese-Effekt)? Wie groß ist die Hysterese?

Hinweise zum Justieren des MI

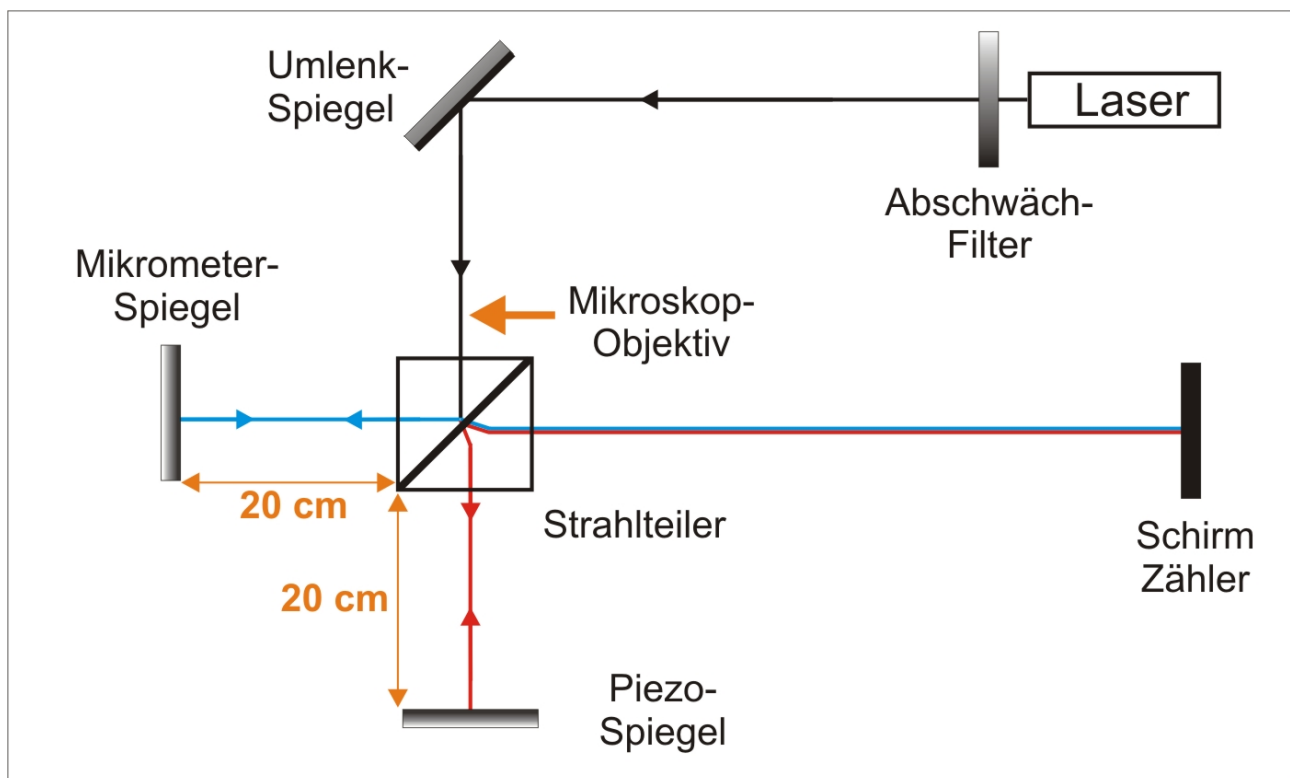


Abbildung 3: Versuchsaufbau

Laserstrahlen sind gefährlich!

- Blicken Sie nie in den direkten Strahl hinein.
- Nehmen Sie bitte auch alle Ihre Uhren und Fingerringe während des Versuches ab (Reflexionen!).

Optische Elemente sind empfindlich!

- Fassen Sie bitte auf keinen Fall, *wirklich niemals*, auf die Oberfläche der Spiegel, Linsen oder Strahlteiler.
- Putzen Sie nur zusammen mit dem Assistenten die optischen Bauteile.

Es kommt darauf an,

- dass die beiden Teillichtbündel den Piezospiegel und den Mikrometerspiegel möglichst mittig treffen und
 - dass die beiden Teillichtbündel auf dem Schirm koaxial zusammenfallen.
- (1) Beginnen Sie zunächst nur mit Umlenkspiegel, Piezospiegel und dem Laserstrahl. Mit dem Umlenkspiegel wird der Laserstrahl auf den Piezospiegel mittig ausgerichtet. Der Piezospiegel wird dann mit seinen beiden Einstellschrauben so justiert, dass einfallender und reflektierter Strahl zusammenfallen – der Rückreflex geht dann in den Laser zurück.
 - (2) Setzen Sie als nächstes den Strahlteilerwürfel in den Strahlengang (Abstand ca. 20 cm vom Piezospiegel). Drehen Sie den Würfel feinfühlig so, dass sich an dem Strahlengang nach (1) nichts ändert.
 - (3) Nun den Mikrometerspiegel einfügen - in möglichst gleichem Abstand vom Strahlteilerwürfel wie den Piezospiegel - und den rücklaufenden Strahl vom Piezospiegel mit Papier abdecken. Der Mikrometerspiegel wird mit den Einstellschrauben wie in (1) so justiert, dass wieder einfallender und reflektierter Strahl zusammenfallen (Rückreflex in den Laser)
 - (4) Wenn Sie jetzt das Papier vor dem Piezospiegel wegnehmen und den Rückstrahl freigeben, müssten Sie auf dem Schirm zwei kleine sich partiell überlappende Lichtfelder beobachten können.
 - (5) Danach wird das Laserlicht mit einem Mikroskopobjektiv divergent gemacht. In der Regel beobachten Sie jetzt auf dem Schirm bereits Interferenzstreifen, die sich als Teile von Kreisen identifizieren lassen. Durch feinfühliges Verstellen der Spiegel und etwas Geduld finden Sie schließlich das Zentrum des Kreisringsystems. Durch vorsichtiges Nachregeln des Umlenkspiegels lässt sich der Strahlengang auf die Mitte des Strahlteilerwürfels zentrieren.

**Überprüfen Sie zu Anfang, dass die alle optischen Bauteile einwandfrei und ohne
Fettfingerabdrücke übernehmen.**

**Wenn Sie den Versuch beenden, muss Ihr Tutor/ Ihre Tutorin die Bauteile wieder kontrollieren.
Helfen Sie bitte dabei, bevor Sie gehen.**

