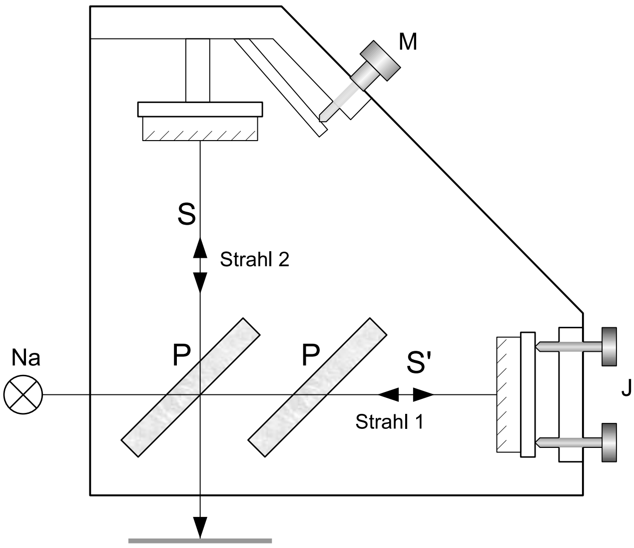
Physikalisches Praktikum für Anfänger - Teil 1
Gruppe 1 - Optik

1.6 Michelson-Interferometer und Newtonsche Ringe

1 Michelson-Interferometer

Interferometer dienen zur Messung von Längen oder Längendifferenzen in Einheiten der verwendeten Lichtwellenlänge. Das Prinzip der Messung besteht in einer Zerlegung des zur Messung benutzten, monochromatischen Lichtes in zwei kohärente, verschiedene Wege durchlaufende Strahlenbündel und ihrer anschließenden



M	–	Mikrometerschraube mit Nonius
J	–	Justierung
P	–	Glasplatte
Na	–	Na-Dampflampe

Abbildung 1: Aufbau des Michelson-Interferometers

Wiedervereinigung. Die hierbei auftretenden Interferenzen lassen Rückschlüsse auf den Unterschied der optischen Weglängen beider Bündel und damit auf die von einem Strahl durchlaufene Messstrecke zu.
Sie lassen sich aber umgekehrt bei bekannter Länge einer Messstrecke auch dazu verwenden, kleine Wellenlängendifferenzen zu messen. Die Genauigkeit dieser Messungen beträgt Bruchteile von Wellenlängen, so dass Interferometer zu den genauesten Präzisionsinstrumenten gehören. Das hier verwendete Interferometer entspricht in seinem Aufbau dem von *Michelson*.
Im ersten Teil des Versuches soll mit Hilfe dieses Interferometeraufbaues der Wellenlängenunterschied der beiden Komponenten $\Delta\lambda$ der Na-D-Linie gemessen werden.

1.1 Versuchsaufbau

Das Licht der Natriumdampflampe (Lampen dieses Typs dürfen nur im kalten Zustand angeschaltet werden!) durchläuft die erste Glasplatte und wird an deren Rückseite durch eine halbdurchlässige Silberschicht in zwei Strahlen aufgestalten (Abb. 1). Beide Strahlen werden an einem Planspiegel zurückgeworfen und treffen wieder auf die Silberschicht. Die Überlagerung des durch sie hindurchtretenden Anteils von Strahl 2 und des reflektierten Anteils von Strahl 1 ist durch das vorne am Gerät liegende Austrittsfenster zu beobachten.
Strahl 1 wird an einem ortsfesten aber justierbaren Planspiegel reflektiert. Über die Justierung kann das durch

Interferenz entstehende Ringsystem zentriert werden. Strahl 2 wird an einem über eine Mikrometerschraube verschiebbaren Planspiegel reflektiert. Der optische Weg S von Strahl 2 (doppelte Entfernung Silberschicht–Spiegel) kann somit verändert werden, wohingegen der optische Weg S' von Strahl 1 konstant bleibt.
Strahl 2 durchläuft auf den Weg von der Silberschicht zum Spiegel und zum Beobachter zweimal die Glasplatte (das $2\sqrt{2}$-fache ihrer Dicke). Damit beide Strahlenbündel bei gleichen geometrischen Weglängen die gleichen optischen Weglängen durchquert haben, ist in Strahl 1 eine identische, unverspiegelte Glasplatte eingebracht.
In anderen Ausführungen wird die Silberschicht auf die Hypothenusenfläche eines rechtwinkligen Glasprismas aufgedampft und dann mit einem zweiten, unversilberten Prisma verkittet. Die sich nun auf der Diagonalfläche des entstandenen Glaswürfels befindende Silberschicht ist sehr gut gegen Umwelteinflüsse geschützt.

1.2 Durchführung

Vor Beginn des eigentlichen Versuches ist das Interferometer zu justieren:

- Lassen Sie durch einen Betreuer die Na-Dampflampe in Betrieb nehmen und stellen Sie sie vor das vordere linke Fenster des Interferometers. **Die Na-Dampflampe darf nur einmal ein- und wieder ausgeschaltet werden und das ausschließlich von einem Betreuer!**
- Schauen Sie in das vordere Austrittsfenster des Interferometers. Falls Sie einen Ausschnitt des Ringsystems sehen, verschieben Sie dessen Mitte durch vorsichtiges Drehen an den sich rechts seitlich befindenden Feinjustierschrauben in das Zentrum des Gesichtsfeldes. Die Spiegelnormalen fallen dann mit den optischen Achsen zusammen. Verständigen Sie einen Betreuer, falls Sie keine Ringabschnitte erkennen können.

Das hier verwendete Licht ist nicht streng monochromatisch, da die Na-D-Linie ($\lambda_{\mathrm{Na-D}} \approx 5896\,\text{Å}$) ein Duplett ist, d.h. aus zwei eng benachbarten Komponenten besteht. Das Verhältnis ihrer Intensitäten beträgt, je nach Natur der Lichtquelle, $1/2$ bzw. $1/\sqrt{2}$. Es müssten daher zwei gegeneinander verschobene Interferenzsysteme zu sehen sein. Die Ringsysteme sind mit dem Auge nur sehr schwer voneinander zu trennen. Fallen aber die hellen Ringe des einen auf die dunklen Ringe des anderen Systems, so kommt es zu einer deutlichen Verminderung des Kontrastes. Der größte Kontrast wird beobachtet, wenn helle auf helle und dunkle auf dunkle Ringe fallen. Diesen Effekt nutzen wir zur Bestimmung des Wellenlängenunterschiedes $\Delta\lambda$ beider Komponenten.
Haben beide Ringsysteme bei den Weglängen S und S' eine Maximum, so bildet sich auch ein Maximum des Kontrastes aus. Dies wird durch das Gleichungssystem

$$\begin{aligned} S - S' &= n \cdot \lambda \\ S - S' &= m \cdot (\lambda + \Delta\lambda) \end{aligned}$$

ausgedrückt. Hierbei sind n und m natürliche Zahlen. Wird das Ringsystem der Wellenlänge λ durch Verschieben des beweglichen Spiegels um die Strecke ΔS um a Maxima verrückt und wird dabei das nächste Kontrastmaximum erreicht, so wurde das Ringsystem der Wellenlänge $\lambda + \Delta\lambda$ um $a - 1$ Maxima verschoben (O.b.d.A. $\Delta\lambda > 0$). Es gilt somit:

$$\begin{aligned} S + 2\Delta S - S' &= (n + a) \cdot \lambda \\ S + 2\Delta S - S' &= (m + a - 1) \cdot (\lambda + \Delta\lambda) \end{aligned}$$

Subtraktion der beiden Gleichungssysteme ergibt:

$$\begin{aligned} 2\Delta S &= a \cdot \lambda \\ 2\Delta S &= (a - 1) \cdot (\lambda + \Delta\lambda) \end{aligned}$$

Elimination von $2\Delta S$ führt auf $\lambda = (a-1)\Delta\lambda$ bzw. $(a-1) = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$. Setzt man dies in die zweite Gleichung des letzten Gleichungssystems ein erhält man:

$$2\Delta S = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \cdot (\lambda + \Delta\lambda) = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} + \lambda$$

Da hier $\Delta\lambda \ll \lambda$ folgt $\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \gg 1$ und weiter $\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \gg \lambda$. Man kann also λ in der letzten Geichung vernachlässigen und erhält somit:

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{2\Delta S} \tag{1}$$

Für ein Kontrastminimum gilt eine ähnliche Überlegung.

Aufgaben:

1. Verschieben Sie den hinteren Spiegel durch Drehen der Mikrometerschraube und notieren Sie die Positionen von ca. 10 aufeinanderfolgende Kontrastminima in Skalenteilen (Noniusteilstrichen). Um den toten Gang der Schraube auszuschalten, drehe man die Schraube bei Beobachtung der Kontraständerungen nur in eine Richtung.

2. Schätzen Sie durch Reproduzierbarkeitstests den Fehler $\Delta(\Delta S)$ der Messwerte.

3. Rechnen Sie mit dem Faktor

$$1\,\text{Schraubenumdrehung} = 50\,\text{Noniusskalenteile} = 0,1\,\text{mm Spiegelverschiebung}$$

die Messwerte in mm um und bestimmen Sie mit Gleichung (1) den Wellenlängenunterschied $\Delta\lambda$. Führen Sie eine Fehlerrechnung durch.

2 Newtonsche Ringe

2.1 Grundlagen

Die *Newtonschen Ringe* bezeichnen eine Interferenzerscheinung an einer dünnen Luftschicht, die von einer Glasplatte und der konvexen Oberfläche einer Linse begrenzt wird (Abb. 2). Sie entstehen ebenso wie die Far-

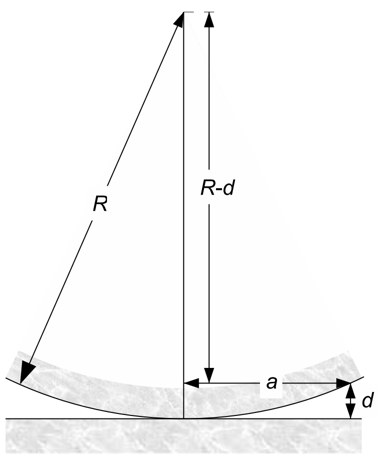


Abbildung 2: Newtonsche Ringe

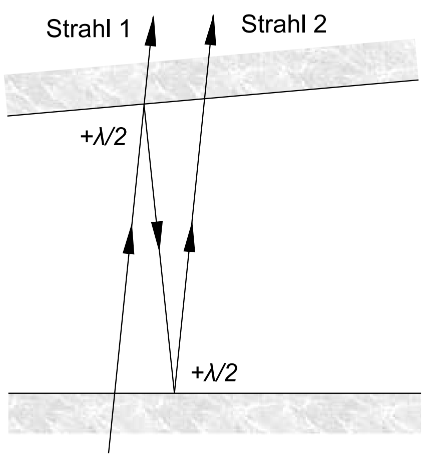


Abbildung 3: Strahlengang des durchf. Lichtes

ben dünner Plättchen durch Interferenz des an der Ober- und Unterseite der Schicht reflektierten Lichtes.
In monochromatischem Licht erkennt man sowohl im durchfallenden als auch im reflektierten Licht konzentrische helle und dunkle Ringe. Berühren sich Glasplatte und Linse, so erscheint im durchfallenden Licht das Zentrum hell (alles Licht wird durchgelassen, keine Interferenz!), im reflektierten jedoch dunkel. Orte, an denen im durchscheinenden Licht helle Ringe zu sehen sind, zeigen im refektierten Licht dunkle Ringe und umgekehrt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Reflektion am Glas (Übergang optisch dünn nach optisch dick) ein Phasensprung von $\lambda/2$ auftritt (Abb. 3; zur Verdeutlichung sind die Strahlen schräg eingezeichnet).
Beobachtet man die Newtonschen Ringe bei weißem Licht, so erfolgt die Auslöschung jeweils nur für eine Farbe (Wellenlänge), so dass die Mischfarbe des restlichen Lichtes entsteht. Die Erscheinung verschwindet durch Überlappung der verschiedenen Ordnungen schon bei einem Gangunterschied von nur wenigen Wellenlängen.
Mit Hilfe der Newtonschen Ringe wird in diesem Versuch der Krümmungsradius einer Linse bestimmt.

2.2 Aufbau und Durchführung

Bei durchfallendem Licht, in dem hier die Messung durchgeführt wird, hängt der Gangunterschied G von Strahl 1 und Strahl 2 (Abb. 3) mit der Dicke der Luftschicht folgendermaßen zusammen:

$$G = 2d + \lambda\,. \tag{2}$$

λ berücksichtigt die beiden Phasensprünge. Bei dunklen Ringen muss außerdem gelten

$$G = (2n+1)\cdot\lambda/2\,. \tag{3}$$

n ist ein natürliche Zahl und wird als *Orndung* des Minimums bezeichnet. Es folgt:

$$2d = \lambda\cdot\left(n-\frac{1}{2}\right)\,. \tag{4}$$

Die Dicke d ist vom Abstand a zum Auflagepunkt abhängig. Wie aus Abb. 2 zu erkennen, gilt in guter Näherung

$$d = \frac{a^2}{2R}\,, \tag{5}$$

a	–	Radius des Ringes
R	–	Krümmungsradius der Linse

Setzt man den Wert für d in obige Formel ein, so ergibt sich

$$R = \frac{a^2}{\lambda\left(n-\frac{1}{2}\right)}\,. \tag{6}$$

Durch Messung von a und n kann bei bekanntem λ also der Krümmungsradius R bestimmt werden. Zur Messung der Ringradien wird ein Projektionsmikroskop verwendet, auf dessen Objekttisch eine Messingbüchse mit der zu untersuchenden Linse und Glasplatte gelegt wird. Die schon mit bloßem Auge sichtbaren Ringe werden vergrößert auf einer Mattscheibe dargestellt.

- Befestigen Sie die Na-Dampflampe oberhalb des Mikroskops, so dass auf der Mattscheibe Ringe sichtbar werden.

Aufgaben:

1. Zentrieren Sie die Ringe mit Hilfe des X-Y-Tisches in die Mitte der Mattscheibe und messen Sie mit dem Lineal ca. 10 Ringradien a aus und notieren Sie ihre Ordnungen n.

2. Ermitteln Sie den Vergrößerungsfaktor des Mikroskops indem Sie den Tisch in X-Richtung (vordere Skala, mit Nonius) um einem mm verschieben und die Bildverschiebung ausmessen.

3. Tragen Sie a^2 einschießlich Fehlerbalken über $n - \frac{1}{2}$ auf. Berücksichtigen Sie bei den Fehlerbalken die Messungenauigkeiten von a und den Fehler des Vergrößerungsfaktors. Zeichnen Sie die Ausgleichsgerade und die Geraden minimaler und maximaler Steigung ein und bestimmen Sie aus deren Steigungen R und den Fehler ΔR.
   Da die hier zu untersuchende Linse eine Bikonvexlinse ist, deren Oberflächen gleiche Krümmungsradien haben, gilt für ihre Brennweite f
   $$f = \frac{R}{2\,(n-1)}\,, \tag{7}$$
   wobei n der Brechungsindex des Glases ist. Er hat hier den Wert $1,516$. Geben Sie f und den Fehler Δf an.

4. Überlegen Sie, wie die Ringe auszuwerten sind, falls ein Abstand δ zwischen Linse und Platte existiert und außerdem unbekannt ist. Wie sieht Gleichung (6) für diesen Fall aus?

Hinweise:
Die Messingkapsel, in der sich Planplatte und Linse befinden, darf nicht geöffnet werden. Wenn Staub zwischen Linse und Platte geraten ist, so ist die Mitte des Bildes nicht notwendigerweise hell. Lassen Sie sich für die Messung nicht zu lange Zeit, da die Lampe die Linsenhalterung erwärmt und diese dadurch verspannt!

Literatur:
Bergmann-Schäfer, Band III Optik, § 3.3 (8.Aufl.)

3.2012/Ra