

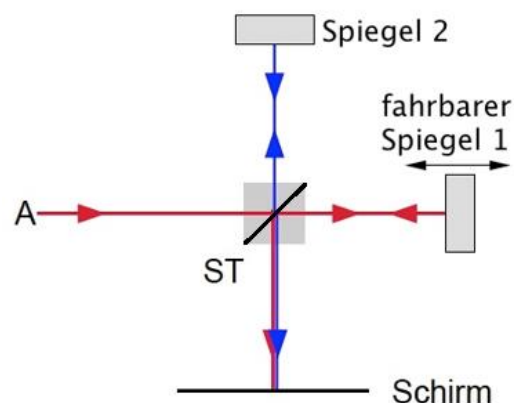
# Versuch 2 - Michelson-Interferometer

## Allgemeines

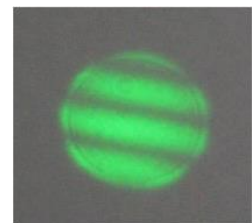
Das Grundprinzip eines Interferometers besteht darin, elektromagnetische Wellen mit sich selbst kohärent interferieren zu lassen. Dies bedeutet, dass die im Interferometer erzeugten Teilstrahlen zueinander in einer zeitlich und räumlich festen Phasenbeziehung stehen müssen, da ansonsten keine feste Interferenzbedingung zwischen den einzelnen Teilstrahlen entstehen kann und somit kein messbares Interferenzbild erzeugt wird.

Interferometrie ist eine Methode zur Messung von Längenänderungen, Brechungsindizes oder Lichtgeschwindigkeiten. Interferometrische Messungen beruhen auf folgendem Prinzip: Der von der Lichtquelle kommende Strahl wird durch einen Strahlteiler in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Bei einem dieser Teilstrahlen wird nun die optische Weglänge, das heißt das Produkt aus Brechzahl und geometrischem Weg, verändert. Er erfährt dabei eine Phasenverschiebung gegenüber dem ungestörten Strahl, mit dem er schließlich wieder überlagert wird. Aus dieser Phasenverschiebung erfolgt eine Änderung des Interferenzbildes, aus der sich dann eine der beiden Größen, Brechzahl oder geometrischer Weg, ermitteln lässt, wenn die andere bekannt ist. Wird beispielsweise die Brechzahl konstant gehalten, so sind Differenzen des geometrischen Wegs bestimmbar, zum Beispiel die Ausdehnung von Materialien, die Krümmung von Oberflächen oder die Dicke von Schichten. Messungen dieser Art werden vornehmlich mit dem Michelson-Interferometer vorgenommen.

In einem Michelson-Interferometer wird der Strahl einer einzelnen Lichtquelle A mittels eines Strahlteilers (ST) zu jeweils 50 Prozent seiner Intensität aufgespalten, auf unterschiedliche Bahnen geschickt und durch zwei Spiegel wieder am Schirm oder Detektor zusammengeführt. Aus dem so auf dem Schirm entstehenden Interferenzmuster kann Information über die Phasen und Intensitäten der einzelnen Teilstrahlen gewonnen werden. Insbesondere enthält die Phasenbeziehung Informationen über die geometrischen und optischen Weglängen, die einen oder beide Teilstrahlen beeinflusst haben.



In dem nun durchzuführenden Versuch ist anstelle des Schirms eine Photodiode angebracht. Jeweils 50% der Intensität beider Teilstrahlen gehen durch eine Irisblende zu diesem Detektor. Werden die beiden Strahlen dort überlagert, sieht man auf einem davorstehenden weißen Papier Interferenzstreifen, wie in der nebenstehenden Darstellung gezeigt ist. Bei guter Zentrierung sollten sich konzentrische Interferenzringe ergeben. Diese resultieren daraus, dass der Strahl eine Divergenz besitzt und die Lichtstrahlen nahe an der optischen Achse eine andere Wegstrecke besitzen als solche weiter außen. Genau im Zentrum wechselt bei Verschiebung von Spiegel 1 mit konstanter Geschwindigkeit die Intensität periodisch von dunkel nach hell, was sich einfach auf einem Oszillographen sehen oder mittels eines elektronischen Zählers aufnehmen lässt.



## Durchführung des Experiments

Experimente mit Lasern sind gefährlich. Daher sind die folgenden Sicherheitshinweise unbedingt zu beachten:

- den Laserstrahl nicht auf Personen richten
- nicht in den direkten oder reflektierten Strahl blicken
- falls Laserstrahlung ins Auge trifft, sind die Augen sofort zu schließen und der Kopf ist sofort aus dem Strahl zu bewegen
- Manipulationen an der Lasereinrichtung sind unzulässig.

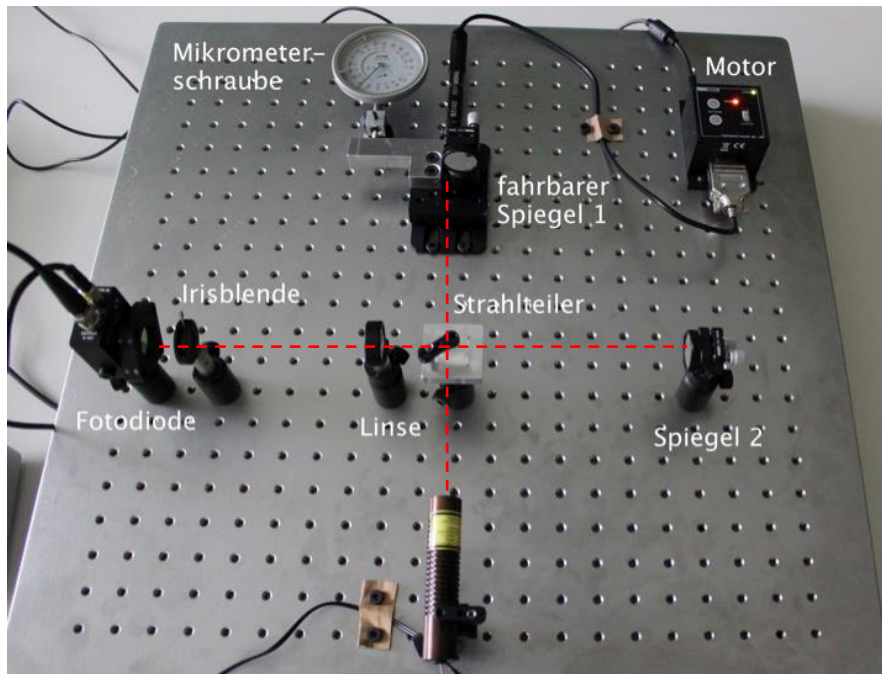
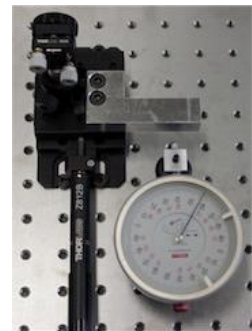


### 1. Aufbau der Optik

Die Halter der Spiegel, des grünen Diodenlaser mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 532 \text{ nm}$  (sowie ein roter Diodenlaser mit einer Wellenlänge von  $\lambda > 650 \text{ nm}$ ) sowie des Detektors sind auf der Platte bereits an den richtigen Stellen montiert. Sie müssen also nur gegebenenfalls die Spiegel und den Strahlteiler einsetzen, sowie den Strahlengang justieren.

Der verschiebbare Spiegel sollte wie in der nebenstehenden Abbildung möglichst nahe am Strahlteiler stehen, das heißt auf der fahrbaren Bühne maximal nach vorne gefahren sein. Dann sind beide Spiegel etwa gleich weit vom Strahlteiler entfernt. Notfalls kann Spiegel 1 auch von Hand mit der Motorsteuerung an diese Position gefahren werden.

Mit Hilfe der folgenden vier Schritte wird nun der Interferometer aufgebaut und justiert. Am Ende sollte der Aufbau folgendermaßen aussehen:



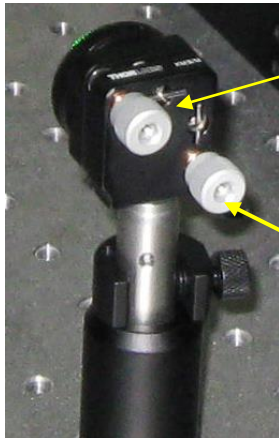
Hierbei ist unbedingt darauf zu achten, dass Sie nicht auf die Spiegelflächen sowie das Glas des Strahlteilers fassen!

### Schritt 1:

- Setzen Sie Spiegel 1 in den Halter ein
- Stellen Sie vor den Laser eine Irisblende und drehen Sie diese zu, bis ein Durchlass von etwa 1 mm Durchmesser bleibt. Diese Blende definiert die Höhe des Strahlengangs.

Die erste Aufgabe besteht darin, den Laserstrahl durch die Irisblende auf die Mitte des Spiegels 1 zu bringen. Justieren Sie dazu Höhe und Richtung des Diodenlasers, sowie die Höhe des Spiegels 1. Fixieren Sie im Anschluss die jeweiligen Elemente.

### Schritt 2:



**Links-Rechts  
Justierung**

**Oben - Unten  
Justierung**

- Auf der Irisblende sollten Sie nun den reflektierten Strahl von Spiegel 1 sehen. Notfalls können Sie auch ein Blatt Papier zu Hilfe nehmen. Dieser sollte nicht wieder in die Öffnung des Lasers fallen.

### Schritt 3:

- Setzen Sie den Strahlteiler und Spiegel 2 in die entsprechenden Halter.
- Drehen Sie den Strahlteiler so, dass der Strahl in der Mittelachse von Spiegel 2 liegt und stellen Sie die Höhe von Spiegel 2 so ein, dass der Strahl ihn in mittlerer Höhe trifft.

### Schritt 4: (Überlagerung der beiden reflektierten Strahlen)

- Stellen Sie den weißen Plastikschirm in den Halter vor den Photodetektor. Darauf sollten Sie jetzt beide reflektierte Strahlen sehen.
- Bringen Sie diese beiden Strahlen durch Drehen an den Feinjustierschrauben von Spiegel 1 und 2 in die Mitte des Schirms zur Deckung. Dort sollten Sie nun Interferenzstreifen erkennen.

## 2. Untersuchung des Interferenzbildes

- a) Stellen Sie die Irisblende vollständig geöffnet in den Strahlengang vor den beweglichen Spiegel 1. Drehen Sie nun die Blende langsam zu. Somit blenden Sie in diesem Arm einen Teil des Laserstrahls aus. Betrachten Sie das Bild der überlagerten Strahlen auf dem Schirm und notieren Sie Ihre Beobachtung gegebenenfalls mit einer Skizze.

---

---

---

- b) Entfernen Sie die Irisblende komplett aus dem Aufbau und setzen Sie die Linse zwischen den Laser und den Strahlteiler. Zur genaueren Analyse kann Spiegel 1 verfahren werden. Verwenden Sie hierzu den Velocity-Schalter des Motors. Mit Hilfe der runden Tasten unter- beziehungsweise oberhalb der Aufschrift „MOVE/JOG“ lässt sich der Motor um eine feste Strecke von etwa 100  $\mu\text{m}$  verfahren. Skizzieren und beschreiben Sie, welches Bild sich nun auf dem Schirm ergibt.



---

---

---

---

---

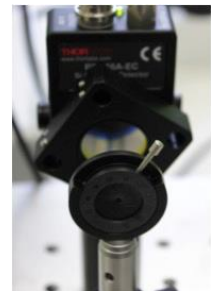
---

---

---

### 3. Messung der Wellenlänge des Lasers

Zur Messung der Wellenlänge verwenden wir die bereits erwähnte Photodiode. Ersetzen Sie den Schirm durch die Photodiode. Diese besitzt eine aufgeschraubte Irisblende, mit welcher die Menge des einfallenden Lichts, sowie der gewünschte Ausschnitt des ausgedehnten Laserbündels eingestellt werden kann. Positionieren Sie die Linse (mit der Brennweite  $f = -50 \text{ mm}$ ) in der Halterung vor der Photodiode, um das Interferenzmuster aufzuweiten. Versuchen Sie durch kleine Nachjustierungen der Spiegelwinkel sowie der Position des verfahrbaren Spiegels 1 den Kontrast zwischen hellen und dunklen Streifen zu erhöhen.



Am Ende sollte die Irisblende so eingestellt sein, dass bei Veränderung der Spiegelposition am Motor entweder ein heller Interferenzstreifen oder kein Licht durch Sie hindurchfällt. Somit ist gewährleistet, dass die Photodiode auf die entsprechenden zu detektieren Maxima und Minima anspricht.

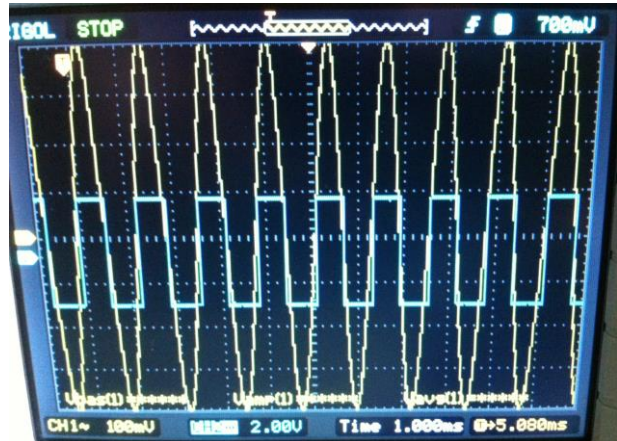
Die Methode zur Bestimmung der Wellenlänge des Lasers besteht darin, Spiegel 1 um eine Strecke  $\Delta s$  zu verfahren und dabei die Anzahl  $n$  der Helligkeitsmaxima (Interferenzstreifen) mit den Pulsen der Photodiode zu messen. Diese haben jeweils einen Abstand von einer halben Wellenlänge  $\lambda_v/2$ . Gleichzeitig wird mit der Mikromettermessuhr der Fahrweg  $\Delta \sigma$  des Spiegels auf etwa 1  $\mu\text{m}$  genau gemessen. Hieraus ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$D_s = n \cdot \frac{\lambda_v}{2}$$



### Durchführung der Messung:

- Stellen sie sicher, dass die Fotodiode mit dem Oszilloskop und der Elektronikbox (siehe Abbildung rechts) verbunden ist. Die Einstellungen für das Oszilloskop sind auf den Experimentiertisch geklebt. Diese sollten allerdings bereits eingestellt sein. Beim Verfahren von Spiegel 1 sollte auf dem Bildschirm des Oszilloskops eine Sinuskurve überlagert von Rechteckimpulsen zu sehen sein. Sollte das Oszilloskop eine nicht so deutliche Sinuskurve zeigen, sollte der Kontrast zwischen hellen und dunklen Interferenzstreifen überprüft werden (siehe Abbildung auf Seite 1) Exemplarisch ist dies in der folgenden Abbildung dargestellt<sup>1</sup>:



Die Sinuskurve zeigt den an der Fotodiode detektierte Intensitätsverlauf. Das Rechtecksignal entspricht den Impulsen, die die Elektronikbox an den Zähler weitergibt. Die Verstärkung der Elektronikbox kann den Lichtverhältnissen im Labor angepasst werden und sollte so gewählt werden, dass lediglich Impulse beim Durchgang von Interferenzmaxima gemessen werden und nicht zum Beispiel durch Stöße am Tisch oder Streulicht von außen. Darüber hinaus muss jede Sinusschwingung von einem entsprechenden Rechtecksignal überdeckt sein, nur dann ist gewährleistet, dass der Zähler auch alle Maxima des Interferenzmusters registriert.

- Zu Beginn der Messung kann der Zähler der Elektronik mit Hilfe der Taste direkt unter dem Display auf Null zurückgesetzt werden. Fahren Sie Spiegel 1 mit Hilfe des Velocity-Schalters am Motor an die Mikrometermessuhr heran. Nur dann kann der Verfahrenweg des Spiegels 1 an der Mikrometermessuhr abgelesen werden. Beobachten Sie die Interferenzstreifen und die Sinuskurve auf dem Oszilloskop. Positionieren Sie den Spiegel 1 in einem Bereich, in welchem der Kontrast der Interferenzstreifen wie in der Abbildung auf Seite 1 ist. Drehen Sie nun die Skala der Mikrometeruhr so, dass sich der Zeiger bei 0 befindet.
- Verfahren Sie Spiegel 1 nun um eine bestimmte Strecke (Vorschlag: 100 – 400  $\mu\text{m}$ ). Lesen Sie die Anzahl  $n$  der registrierten Helligkeitsmaxima an der Elektronikbox ab und notieren Sie die Messwerte in der Tabelle.  
**Achtung:** Die Mikrometermessuhr misst pro Umlauf 200  $\mu\text{m}$ !
- Berechnen Sie die Wellenlänge des Lasers aus den zuvor bestimmten Werten und wiederholen Sie die Messung mehrfach, um deren Reproduzierbarkeit zu untersuchen und den statistischen Messfehler abzuschätzen.

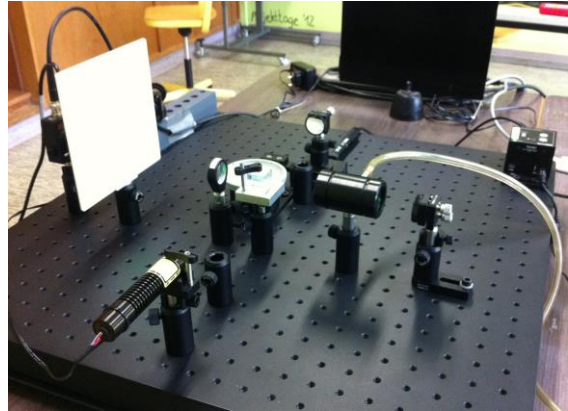
$\Delta s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$n$	$\lambda$ [nm]

<sup>1</sup> Schalten Sie gegebenenfalls die Fotodiode am seitlich angebrachten Schalter ein, falls Sie kein Signal bekommen sollten.



#### 4. Messung des Brechungsindex $n_0$ von Luft unter Normalbedingungen

Stellen Sie den weißen Schirm vor die Fotodiode, so dass die Seite mit der Strichmarkierung vorne ist. Weiten Sie den Strahl mit der Linse (-50 mm) auf. Justieren Sie so, dass Sie möglichst breite parallele Interferenzstreifen sehen.



Stellen Sie wie in nebenstehender Grafik gezeigt, die Luftkuvette in den Strahlengang vor den festen Spiegel und justieren Sie die Höhe und den Winkel der Kuvette so, dass die Interferenzstreifen immer noch gut sichtbar sind. Markieren Sie einen Interferenzstreifen mit Bleistift auf dem Schirm.

Belüften Sie die Kuvette bis der angezeigte Druck Null ist. Pumpen Sie jetzt mit der Handpumpe langsam die Luft heraus – die Interferenzstreifen sollten nun langsam an der Markierung vorbeiwandern. Wird der Druckhebel einmal betätigt, so verschiebt sich das Muster um etwa einen Streifen, das heißt, der optische Weg in diesem Arm hat sich dann um  $\lambda/2$  geändert. Dies liegt daran, dass sich durch das Pumpen der Druck in der Kuvette verändert hat, wodurch es zu einer Änderung der optischen Dichte sich darin befindlichen Luft. Dadurch kommt es zu einer Veränderung der Brechzahl  $n$ , und es ergibt sich ein Gangunterschied  $\delta$  der miteinander interferierenden Laserstrahlen. Mit der Länge der Glaskuvette  $L$  ergibt sich die Formel:

$$\Delta\delta = 2 \cdot L \cdot \Delta n$$

Hierbei berücksichtigt der Faktor 2 die Tatsache, dass die Kuvette zweimal vom Laserstrahl durchlaufen wird.  $\Delta\delta$  lässt sich durch die Anzahl  $m$  der durch die Beobachtungsebene laufenden Interferenzstreifen bestimmen. Es gilt:

$$m \cdot \lambda = 2 \cdot L \cdot \Delta n$$

Wenn es möglich wäre, die Luft komplett auszupumpen und dabei  $m$  Interferenzstreifen am Markierungsstrich vorbeiwandern zu sehen, dann würde folgender Zusammenhang gelten:

$$m \cdot \lambda = (n - 1) \cdot L$$

Da dies nicht möglich ist messen wir stattdessen die Zahl der vorbeiwandernden Interferenzstreifen als Funktion des Drucks beim Auspumpen. Dazu pumpt ein Experimentator langsam mit Hilfe der Handpumpe die Luft aus der Kuvette aus und liest den Druck  $p$  [mbar] ab. Ein zweiter zählt die Zahl  $m$  der vorbeiwandernden Streifen<sup>2</sup>. Füllen Sie hierzu die folgende Tabelle aus an.



$m$							
$p$ [mbar]							

Zur Bestimmung des Brechungsindex von Luft unter Normalbedingung verwendet man die Proportionalität zwischen dem Term  $(n - 1)$  und der Teilchen  $N$  pro Volumen. Mit Hilfe der idealen Gasgleichung<sup>3</sup>  $p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$  folgt daraus:

<sup>2</sup> **Tipp:** Lesen Sie den Druck nach jeweils 10 vorbeilaufenden Streifen ab.

<sup>3</sup> Als ideales Gas bezeichnet man in der Physik eine idealisierte Modellvorstellung eines realen Gases. Dabei wird von einer Vielzahl von Teilchen in ungeordneter Bewegung ausgegangen, die nur durch Stöße miteinander wechselwirken.

$$n - 1 \sim \frac{N}{V} = \frac{p}{k_B T}$$

$$n_0 - 1 \sim \frac{N}{V} = \frac{p_0}{k_B T_0}$$

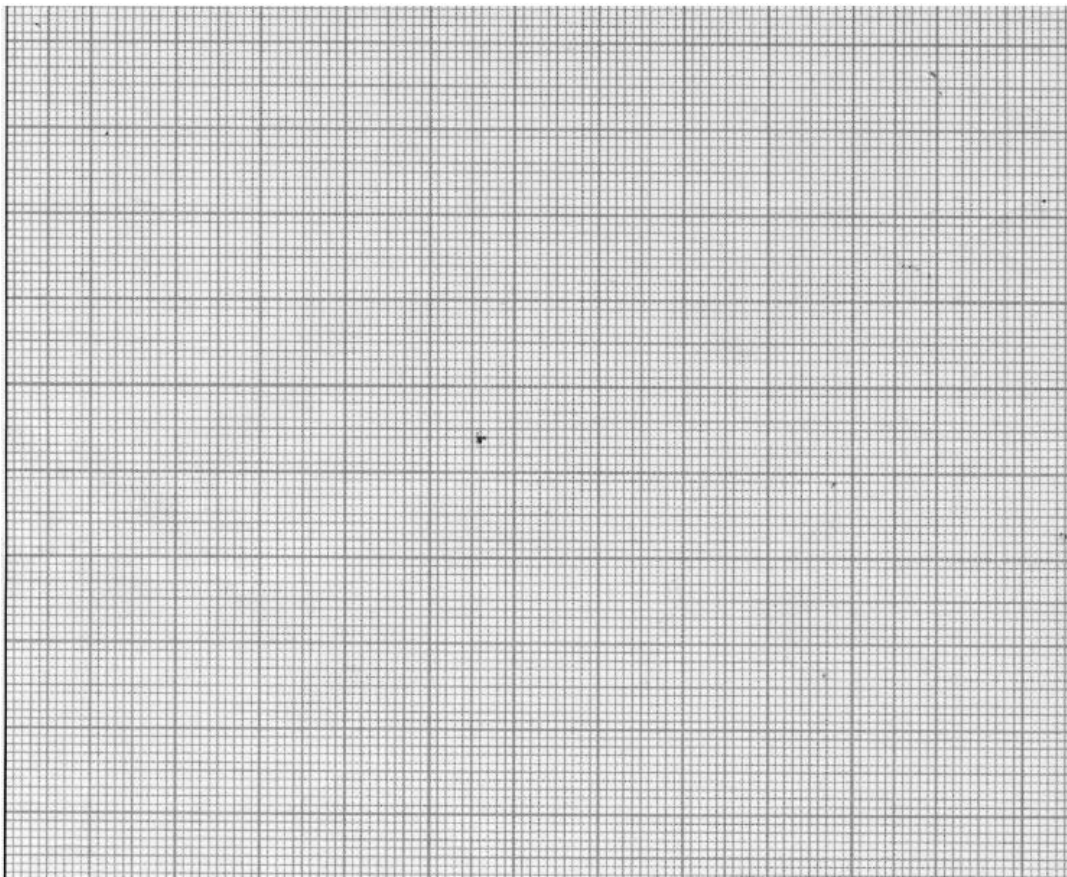
wobei  $k_B$  die Boltzmann-Konstante,  $T$  und  $p$  die Temperatur und der Druck in der Küvette und  $T_0$ ,  $p_0$  und  $n_0$  die Temperatur, der Druck und der Brechungsindex der Luft unter Normalbedingungen sind. Allgemein gilt  $p_0 = 1013 \text{ mbar}$  und  $T_0 = 273 \text{ K}$ . Bildet man den Quotienten aus obigen Gleichungen so ergibt sich:

$$\frac{n_0 - 1}{n - 1} = \frac{p_0 \cdot T}{p \cdot T_0}$$

und schließlich

$$n_0 - 1 = (n - 1) \cdot \frac{p_0 \cdot T}{p \cdot T_0} = \frac{\lambda}{2L} \cdot \frac{m}{p} \cdot \frac{p_0 T}{T_0}$$

Man erhält also einen linearen Zusammenhang zwischen der Anzahl  $m$  der vorbeiwandernden Interferenzstreifen und dem Druck  $p$ , der sich in einem Diagramm durch eine Gerade darstellen sollte. Zeichnen Sie die Messpunkte auf dem abgedruckten Millimeterpapier ein und bestimmen Sie die Steigung der Ausgleichsgeraden aus dem entsprechenden Diagramm.



Berechnen Sie mit der Steigung der Geraden, den Werten  $\lambda = 532 \text{ nm}$  sowie  $L = 50 \text{ mm}$  und der Formel

$$n_0 = 1 + \text{Steigung} \cdot \frac{\lambda}{2L} \cdot \frac{p_0 T}{T_0}$$

den Brechungsindex  $n_0$  von Luft.