

409 – Newtonsche Ringe

1. Aufgaben

- 1.1 Beobachten Sie die Interferenzen gleicher Dicke (Newtonsche Ringe) zwischen einer Linse und einer planparallelen Platte, und messen Sie die Ringabstände.
- 1.2 Berechnen Sie daraus den Krümmungsradius der Linse sowie die Größe der Deformation an der Auflagefläche.

2. Grundlagen

Stichworte:

Lichtwelle, Reflexion, Brechung, Interferenz, Interferenzen gleicher Dicke, Kohärenz, Gangunterschied, Ausgleichsgerade

2.1 Zur Einleitung etwas Optik

2.1.1 Das Licht

Licht ist eine *elektromagnetische Welle*. Es bezeichnet den Teil des elektromagnetischen Spektrums, der für den Menschen sichtbar ist und umfasst einen Wellenlängenbereich von etwa 400 nm (violett) bis 700 nm (rot). An den kurzwelligeren Teil grenzt das Gebiet der UV- (Ultraviolett-) Strahlung sowie der Röntgen- und Gammastrahlen. Auf der langwelligen Seite folgen die Infrarot- (IR-, Wärme-) Strahlung sowie Mikro- und Radiowellen.

Licht ist eine sinusförmige Transversalwelle. Ein einzelner Lichtwellenzug besitzt eine feste Ausbreitungsebene im Raum und ist damit *polarisiert*.

Neben den Welleneigenschaften besitzt das Licht auch Teilchencharakter. Das Lichtteilchen wird *Photon* genannt. Seine Energie ist wellenlängen- bzw. frequenzabhängig und beträgt $E = h \cdot \nu$ (h ist das Plancksche Wirkungsquantum). Den Zusammenhang zwischen Wellenlänge λ und Frequenz ν vermittelt die (im Vakuum konstante) Lichtgeschwindigkeit c über die Gleichung $c = \lambda \cdot \nu$.

Licht entsteht immer dort, wo angeregte Atome in einen energieärmeren Zustand zurückkehren, d.h. Elektronen von höheren auf niedrigere Energieniveaus springen und den Differenzbetrag ΔE als Photon mit genau dieser Energie abgeben. Die Anregung kann durch Wärme (Glühlampe), elektrisch (Gasentladung/Leuchtstoffröhre) oder z.B. auch chemisch erfolgen. Im Versuch wird als Lichtquelle eine mit Na-Dampf gefüllte Gasentladungsröhre verwendet. Diese emittiert ein sogenanntes *Linienpektrum*, d.h. Licht mit ganz bestimmten Wellenlängen, in unserem Fall zwei sehr eng beieinanderliegende gelbe Spektrallinien (Na-Doppellinie: $\lambda = 589.0$ und 589.6 nm).

Es gibt auch andere Arten von Spektren, z.B. das vom Regenbogen oder der Lichtbrechung in einem Prisma bekannte kontinuierliche Spektrum, welches von glühenden Festkörpern bzw. der Sonne abgestrahlt wird.

2.1.2 Wie verhalten sich Lichtstrahlen und -wellen?

Es gibt eine ganze Reihe Phänomene im Zusammenhang mit dem Licht, von denen einige hier kurz in Erinnerung gerufen werden sollen:

Reflexion entsteht beim Auftreffen von Licht auf eine Grenzfläche zwischen Stoffen mit verschiedenen Brechzahlen. Die *Brechzahl* bzw. der Brechungsindex n ist ein Maß für die „optische Dichte“ eines Mediums und umgekehrt proportional zur Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Im Vakuum (näherungsweise auch in Luft) ist $n = 1$. Der *Reflexionsgrad* R lässt sich bei senkrechtem Einfall relativ einfach berechnen

$$R = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 \quad (1)$$

und beträgt für Glas (Brechzahl ≈ 1.5) ca. 4%. Bei schrägem Lichteinfall wird er größer, was sich an einer spiegelnden Wasserfläche oder Glasscheibe leicht nachprüfen lässt.

Brechung entsteht dort, wo auch die Reflexion auftritt. Der Teil des Lichtes, welcher nicht reflektiert wird, erfährt bei Eintritt in das optisch dichtere (oder dünnere) Medium eine Änderung der Ausbreitungsrichtung (bestes Beispiel: Löffel im Wasserglas von der Seite betrachtet). Die Winkeländerung wird durch das *Brechungsgesetz* beschrieben

$$\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = n_2 / n_1 \quad (2).$$

Dispersion hat damit zu tun, dass sich die Brechzahl eines Mediums (z.B. Glas) in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes geringfügig ändert. Damit ist der Brechungswinkel für jede Farbe ein anderer, wodurch es bei weißem Licht im Prisma zu einer Aufspaltung in die einzelnen Spektralfarben kommt. In der Natur geschieht dasselbe beim Regenbogen.

Interferenz bildet die Grundlage für unseren Versuch „Newtonsche Ringe“. Deshalb gibt es hierfür ein eigenes Kapitel.

2.1.3 Interferenz

„Interferieren“ heißt „sich überlagern“, d.h. man versucht, zeitlich stationäre Überlagerungsbilder zu beobachten. Damit dies möglich ist, müssen die Lichtwellenzüge dieselbe Wellenlänge und dieselbe Polarisationsrichtung besitzen und sich außerdem zu einer bestimmten Zeit an derselben Stelle im Raum treffen. Man bezeichnet sie in diesem Fall als „kohärent“. Wir haben dann die Überlagerung zweier Sinuswellen (vgl. Bild 1), die je nach Lage zueinander eine Verstärkung der Intensität oder auch komplette Auslöschung zur Folge haben kann (Auslöschung bei einem *Gangunterschied* von $\lambda/2$, maximale Verstärkung bei Gangunterschied 0 bzw. ganzzahligen Vielfachen von λ).

Licht aus unterschiedlichen Lichtquellen ist in der Regel nicht interferenzfähig (inkohärent), da es im Unterschied zu Schall- oder Wasserwellen aus vielen kurzen Wellenzügen besteht,

die i. Allg. bezüglich ihrer Wellenlängen, Polarisations Ebenen und Ausbreitungsrichtungen verschieden sind. Eine Ausnahme bilden Laser (speziell Gaslaser), da bei diesen ein sehr langer Wellenzug mit fester Frequenz und konstanter Polarisationsrichtung erzeugt wird.

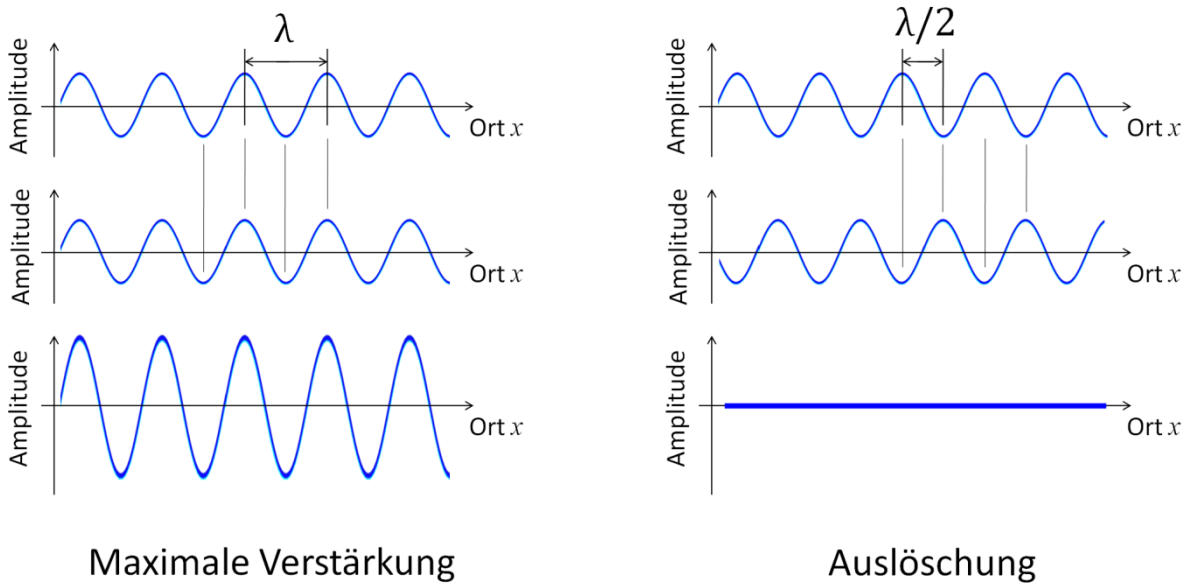


Bild 1: Überlagerung von jeweils zwei Sinuswellen (oben + Mitte) mit unterschiedlicher örtlicher Lage. Das Ergebnis der Interferenz ist jeweils darunter dargestellt.

Wenn man aber Licht aus ein- und derselben Quelle in zwei oder mehrere Teilbündel (-strahlen, -wellenzüge) aufspaltet, dann kann es zur Interferenz kommen, vorausgesetzt die Wege, welche beide Wellen vom Ort ihrer Teilung bis zur Stelle, wo sie interferieren sollen, zurücklegen, sind nicht zu unterschiedlich, da nur die Teile der Wellenzüge das Interferenzmuster erzeugen, welche sich tatsächlich treffen, während der Rest einen dem Bild überlagerten Gleichlichtanteil liefert, der den Kontrast herabsetzt (vgl. Bild 2).

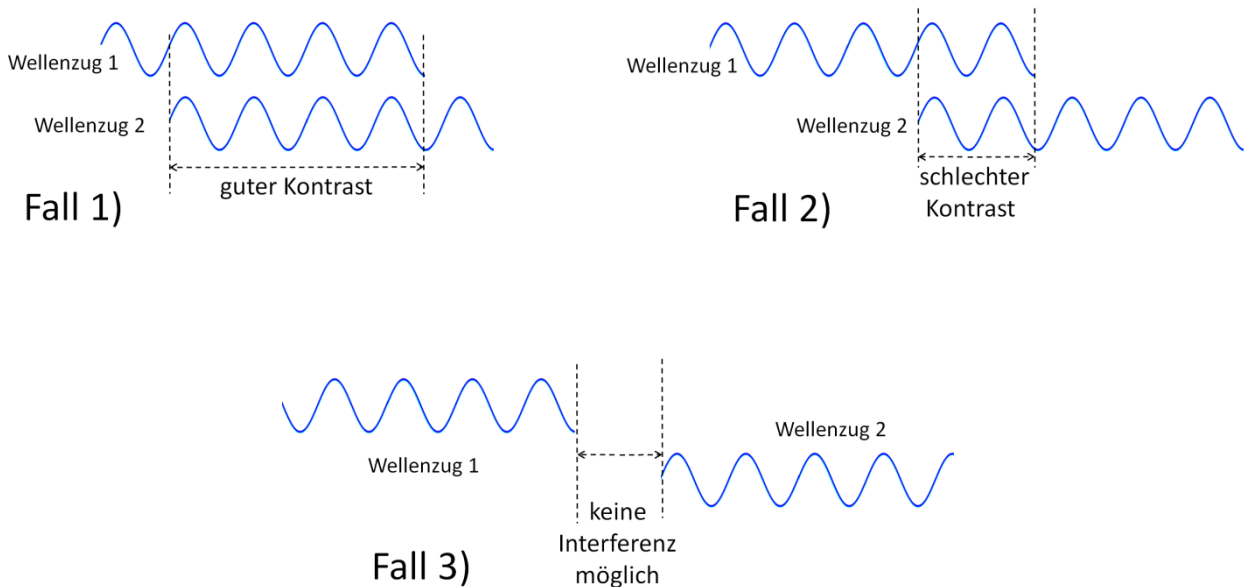


Bild 2: Veranschaulichung der Kohärenz.

Desweiteren sollte das Licht nur aus einer Spektrallinie bestehen bzw. darf bei mehreren Linien der Abstand der Linien (wie in unserem Fall) nicht zu groß sein. Mit weißem Licht (Wellenlängenbereich von 400 bis 700nm) ist es z.B. nur sehr eingeschränkt möglich, Interferenzen zu erzeugen. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Breite einer Spektrallinie (bzw. eines spektralen Bereiches) und der Länge des zugehörigen Wellenzuges. Je breiter die Linie, desto kürzer der Wellenzug.

2.2 Entstehung der Newtonschen Ringe

Legt man eine flach gewölbte Linse auf eine Planglasplatte (Bild 3), so entstehen durch Reflexion an den Grenzflächen Teilstrahlen, die miteinander interferieren können. Vor allem der an der Unterseite der Linse reflektierte Strahl 1 und der an der Oberseite der Glasplatte reflektierte Strahl 2 sind hier von Interesse. Beide Strahlen sind nur der Deutlichkeit halber versetzt gezeichnet. Alle Richtungsänderungen, die bei der Brechung an den Grenzflächen entstehen, sind für die weiteren Betrachtungen unwesentlich und können vernachlässigt werden.

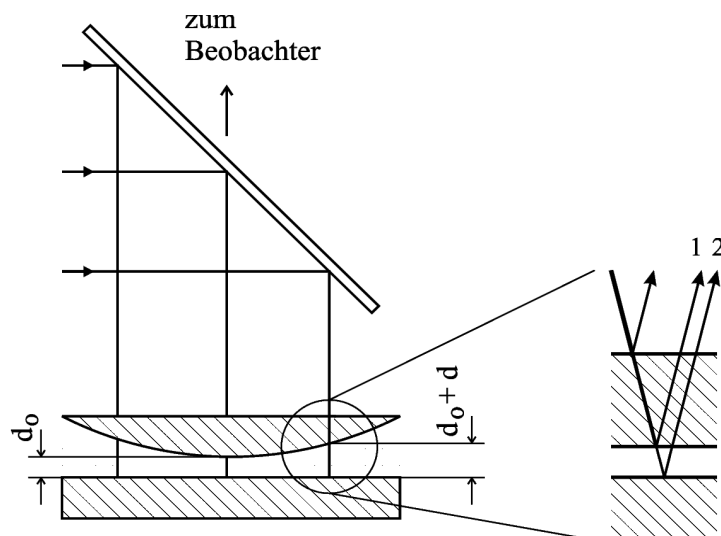


Bild 3: Zur Entstehung der Newtonschen Ringe.

Aufgrund des Wegunterschiedes (näherungsweise die doppelte Dicke der Luftschicht zwischen Linse und Platte) haben beide Strahlen beim Zusammentreffen einen Gangunterschied, der je nach seiner Größe zu Verstärkung (hell) oder Abschwächung/Auslöschung (dunkel) führt. Bei einer idealen sphärischen Linse bilden die Stellen mit gleichem Gangunterschied konzentrische Kreise um den Auflagepunkt (Interferenzen gleicher Dicke), d.h. der Beobachter sieht vom Zentrum ausgehend abwechselnd helle und dunkle Kreise, die „Newtonschen Ringe“.

Auch bei nicht exakt sphärischen Objekten lassen sich Interferenzen gleicher Dicke beobachten, welche dann natürlich keine Kreise mehr sind. Aus den Abweichungen von der Idealform kann man damit Aussagen z.B. über die Qualität einer Linse oder die Güte einer Oberfläche erhalten.

Frage: Warum bzw. unter welchen Voraussetzungen darf man die Reflexion an der oberen, planen Linsenfläche unberücksichtigt lassen?

2.3 Herleitung der Auswertformeln

Ist r der Abstand vom Auflagepunkt der Linse auf der Glasplatte bis zum Interferenzring, so hat die Luftschicht zwischen Linse und Glasplatte dort die Dicke $d_0 + d$. Der Anteil d_0 berücksichtigt, dass keine ideale Berührung vorliegt. Durch Staub kann der Abstand vergrößert, durch Deformation verkleinert werden.

Sieht man von der geringfügigen Brechung der Lichtstrahlen in der Linse ab, so beträgt der Wegunterschied der beiden interferierenden Wellenzüge $2 \cdot (d_0 + d)$. Da die Reflexion des zweiten Wellenzuges am optisch dichteren Medium erfolgt (Phasensprung $\lambda/2$), ist noch ein zusätzlicher Gangunterschied von $\lambda/2$ zu addieren. Der Gesamtgangunterschied Δx beträgt damit:

$$\Delta x = 2 (d_0 + d) + \lambda/2 \quad (3).$$

Die Phasenverschiebung (Winkeldifferenz φ bezogen auf eine volle Periode 2π) ist allgemein

$$\varphi = 2\pi \cdot \Delta x / \lambda \quad (4),$$

und in diesem speziellen Fall (eingesetzt (3) in (4))

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} (d_0 + d) + \pi \quad (5).$$

Für ganzzahlige Vielfache einer vollen Periode (bzw. geradzahlige Vielfache von π)

$$\varphi = 2k \cdot \pi \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

verstärken sich die interferierenden Wellenzüge, und es entsteht ein heller Ring.

Für ungeradzahlige Vielfache von π :

$$\varphi = (2k+1) \cdot \pi \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (7)$$

löschen sich die interferierenden Wellenzüge aus und es entsteht ein dunkler Ring.

Den Zusammenhang zwischen dem Radius r_k des k -ten Ringes und der Dicke d kann man entsprechend Bild 4 mit Hilfe des Höhensatzes im rechtwinkligen Dreieck ABC ermitteln. Es ist

$$d \cdot (2R - d) = r_k^2 \quad (8).$$

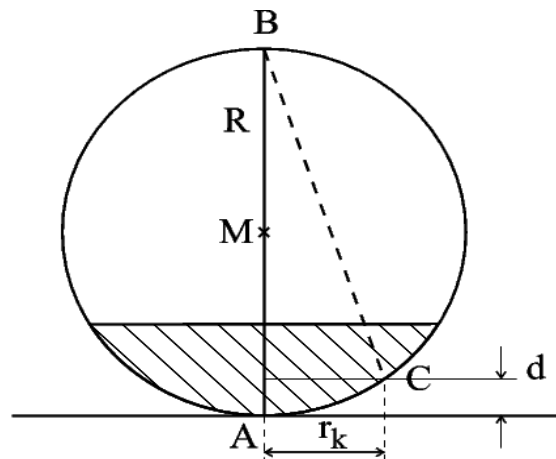


Bild 4: Zur Ermittlung der Dicke.

Bei schwach gewölbten Linsen ist $d \ll R$, so dass in Gl.(8) das Glied in d^2 vernachlässigt werden darf. Aus den Gl. (5), (6), (7) und (8) folgt dann für die dunklen Ringe:

$$r_k^2 = k \cdot R \cdot \lambda - 2 d_0 R \quad (k = 0, 1, \dots) \quad (9)$$

und für die hellen Ringe:

$$r_k^2 = \left(k - \frac{1}{2}\right) R \lambda - 2 d_0 R \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (10).$$

3. Versuchsdurchführung

3.1 Messaufbau

Die Messanordnung besteht aus einer Na-Dampf-Lampe, deren Licht über einen Strahlteiler (vgl. Bild 3) auf das Versuchsobjekt gelenkt wird. Das reflektierte Licht gelangt in ein Messmikroskop mit Okular-Fadenkreuz, welches mit einer Mikrometerschraube seitlich verschoben werden kann.

Die Anordnung wird so justiert, dass das Gesichtsfeld im Okular des Messmikroskops gut ausgeleuchtet ist und bei einer Verschiebung des Mikroskops das Fadenkreuz die Interferenzringe durchwandert. Eine größere Anzahl Ringe (ca. 20) wird ausgemessen. Günstig ist, die dunklen Ringe zu vermessen, weil diese für das Auge am schärfsten erscheinen. Die Lage des Mittelpunktes wird indirekt bestimmt, indem die Ringe sowohl links als auch rechts ausgemessen werden.

Zur Überprüfung der Kugelgestalt der Linsenfläche wird die Linse um 90° gedreht und die Messung wiederholt.

3.2 Auswertung

Für beide Messungen wird r_k^2 über k aufgetragen und durch *lineare Regression* die beste *Ausgleichsgerade* $y = B \cdot x + A$ bestimmt. Nach Gl.(9) gilt dann: $B = R \cdot \lambda$ und $A = -2 \cdot R \cdot d_0$.

D.h., aus den Steigungen der Geraden können die beiden Krümmungsradien R berechnet werden. Für λ verwenden wir dabei die Mitte der beiden Wellenlängen der Na-Doppellinie: $\lambda = 589,3 \text{ nm}$.

Aus den Achsenschnittpunkten kann bei Kenntnis von R die Größe d_0 berechnet werden. Wie ist der Wert d_0 zu interpretieren?

3.3 Hinweise zur Genauigkeitsabschätzung

Die Aufnahme von vielen Messwerten bietet die Möglichkeit einer statistischen Auswertung. Das Computerprogramm „Lineare Regression“ legt eine Ausgleichsgerade durch alle Messpunkte. In der Streuung der Punkte um die ideale Gerade stecken bereits alle aufgetretenen zufälligen (Mess-) Fehler, d.h. die vom Programm ausgegebenen Größen ΔB bzw ΔA können direkt als die Messgenauigkeiten von B und A betrachtet werden, allerdings mit einer Einschränkung:

ΔB und ΔA (für Anstieg und Achsenschnittpunkt) ist bei allen gängigen Computerprogrammen der sogenannte „Standardfehler“. Dieser besitzt nur eine statistische Sicherheit von 68%. Üblicherweise wird in der Physik mit 95% statistischer Sicherheit gearbeitet, was bei 20 Messwerten bedeutet, die Fehlerangaben mit dem Faktor 2 zu multiplizieren (Fragen Sie dazu auch ihren Assistenten).

Aus ΔB erhält man direkt ΔR . Aus ΔA und ΔR ergibt sich durch Addition relativer Fehler Δd_0 .

Literatur:

Fehlerrechnung – leicht gemacht: Link

http://www.physik.uni-jena.de/pafmedia/studium/phys_gp/FehlerrechnungLeichtGemacht_PDF.pdf

Weitere Literatur: Link http://www.physik.uni-jena.de/Literatur_p_131600.html