

# O-08: Newtonsche Ringe

(Version 1 – 15. November 2022)



Licht zeigt aufgrund seiner Wellennatur teilweise verblüffende Phänomene, die wir als Interferenz bezeichnen. Im Alltag und in der Natur begegnen wir vielfältigen Interferenzerscheinungen häufig, ohne uns dessen bewusst zu sein. Die schillernden Farben auf einer Seifenblase, einer DVD oder einem Ölfilm, das leuchtende Farbenspiel vieler Schmetterlinge, Vögel oder Muschelschalen, all dies beruht auf der Interferenz von Licht an mikroskopischen Schichten. In der Wissenschaft wird die Beobachtung von Interferenzerscheinungen in den unterschiedlichsten Anwendungen benutzt. So stellt z. B. Beugung von Röntgenstrahlen die Standardmethode zur Strukturaufklärung dar, welche u. a. zur Entdeckung der Doppelhelix von DNS geführt hat (s. oben rechts die Originalaufnahme aus R. E. Franklin und R. G. Gosling, *Nature* **171**, 740 (1953)).

In diesem Versuch wird die Beugung von Licht an der gewölbten Oberfläche einer Linse dazu benutzt, um den Krümmungsradius zu ermitteln, der die Brennweite der Linse bestimmt. Dabei wird das Licht im Luftspalt zwischen der Linse und der Tischplatte mehrfach reflektiert, so dass die verschiedenen Strahlen miteinander interferieren und das bekannte Phänomen der Newtonschen Ringe zeigen.

## Eigenschaften von Wellen

Beugungerscheinungen sind keine Eigenheit von Licht, sondern können bei allen Arten von Wellen auftreten, z. B. bei Schall oder in Wasser. Um besser zu verstehen, unter welchen Bedingungen sie auftreten und welchen Gesetzmäßigkeiten sie folgen, benötigen wir nur ein paar Begriffe zur Beschreibung von Wellen. In diesem Zusammenhang verstehen wir unter einer Welle einen *periodischen Vorgang*, der charakterisiert ist durch eine physikalische Größe, die sich in Ort bzw. Zeit so verändert, dass sie sich nach Durchlaufen einer vollen Periode identisch wiederholt. Bei Lichtwellen ist diese Größe die elektrische Feldstärke, bei Schallwellen der Druck des kompressiblen Mediums (z. B. Luft), bei einer Pendelschwingung die Auslenkung aus der Ruhelage, usw.

Allgemeine periodische Größen lassen sich mathematisch durch ein Überlagerung von idealisierten, *unendlichen* Wellen darstellen, welche ihrerseits durch eine einfache Sinusfunktion beschrieben werden können, wie in Abb. 1 schematisch gezeigt ist. Diese idealisierten Wellen hängen von drei bestimmenden Größen ab, ihrer *Amplitude*, *Periodenlänge* und *Phase*. Unter der Amplitude versteht man den maximalen Wert, den die periodische Größe annehmen kann, also z. B. die größte Auslenkung des Pendels oder die maximale elektrische Feldstärke der Lichtwelle. Die Periodenlänge einer *räumlichen* Wellen ist der Abstand zwischen zwei benachbarten Orten, an denen

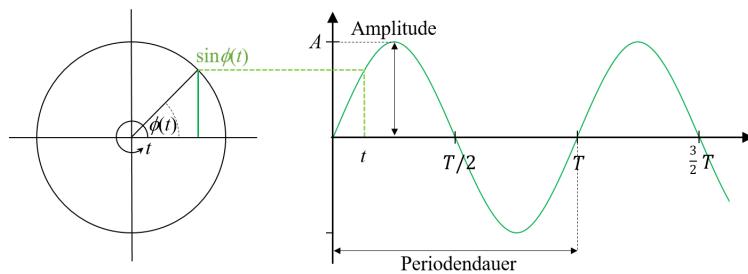


Abbildung 1: Eine Welle (rechts) ist ein periodischer Vorgang, der sich auch als die Auslenkung eines Zeigers (links) auffassen lässt. Nach einem kompletten Umlauf des Zeigers wiederholt sich der Vorgang, ebenso wie die Welle nach einer vollen Periode wieder von vorn beginnt.

ein fester Wert der periodischen Größe angenommen wird, also z. B. das Maximum. Diesen Abstand nennt man die *Wellenlänge* (üblicherweise bezeichnet mit dem Symbol  $\lambda$ ). Eine allgemeine Eigenschaft von Wellen ist der feste Zusammenhang zwischen der räumlichen und der *zeitlichen* Periodenlänge, üblicherweise als *Periodendauer*  $T$  bezeichnet. Dies röhrt daher, dass die Welle eine feste Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  besitzt, und daher stets dieselbe Zeit  $T$  benötigt, um eine volle Wellenlänge  $\lambda$  zurückzulegen,

$$\lambda = c \cdot T .$$

Für elektromagnetische Wellen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum eine fundamentale Naturkonstante. Oft gebraucht man auch den Begriff der *Frequenz* einer Wellen, womit die Häufigkeit gemeint ist, mit der sich der periodische Vorgang wiederholt. Sie ist folglich der Kehrwert der Periodendauer und wird üblicherweise bezeichnet mit dem Symbol  $\nu = 1/T$ .

Die Phase  $\phi_0$  einer Welle legt fest, welchen Wert die periodische Größe an einem bestimmten Zeitpunkt  $t_0$  annimmt - ob sie beispielsweise ein Maximum annimmt oder, wie im Beispiel in Abb. 1 zum Zeitpunkt  $t_0 = 0$  gerade einen Nulldurchgang hat. Mit dieser Kenntnis ist zusammen mit der Wellenlänge und der Amplitude der gesamte Verlauf der periodischen Größe festgelegt. So spricht man beispielsweise von der *Mondphase*, und bringt damit zum Ausdruck, in welcher Position seiner Umlaufbahn um die Erde sich der Mond gerade befindet. Weil der Begriff der Phase eine zentrale Rolle bei der Beschreibung von Interferenzerscheinungen spielt, soll er hier etwas ausführlicher erklärt werden. Dazu führen wir die sog. *Zeigerdarstellung* ein, bei der die periodische Größe als Auslenkung eines Zeigers aufgefasst wird, welcher innerhalb einer Periodendauer  $T$  auf einem Kreis mit dem Radius der Amplitude  $A$  der Welle umläuft, ähnlich wie die Zeiger auf einer Uhr (allerdings konventionsgemäß *entgegen* dem Uhrzeigersinn!), s. Abb. 1. Den Winkel, den dieser Zeiger zum Zeitpunkt  $t$  gegen die positive horizontale Achse bildet, bezeichnet man als die momentane Phase  $\phi(t)$  der Welle. Für einen kompletten Umlauf, den der Zeiger in der Periodendauer  $T$  absolviert, beträgt dieser Winkel  $2\pi$ , eine volle Periode. Wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, hat diese momentane Phase großen Einfluss darauf, wie sich zwei (oder mehrere) Wellen überlagern.

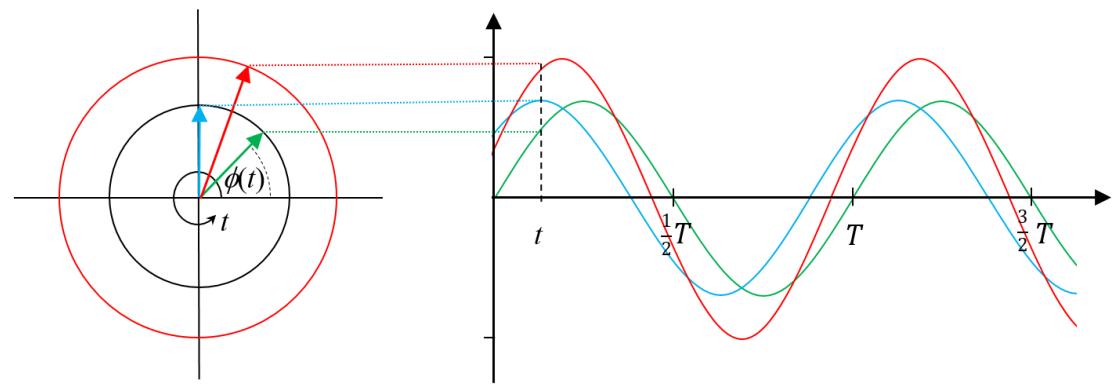


Abbildung 2: Zwei Wellen (grün, blau) mit derselben Amplitude und Periodendauer sowie einer Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  überlagern sich zu einer neuen Welle (rot) mit derselben Periodendauer, aber einer anderen Phasenlage und Amplitude.

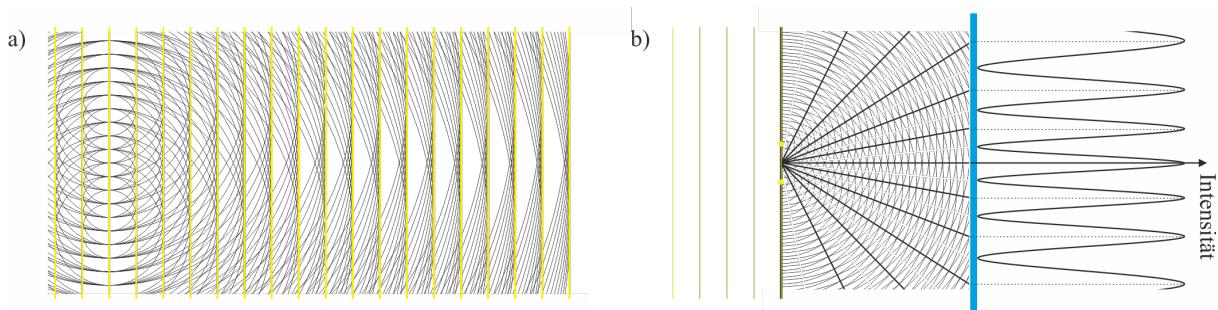
## Interferenz

Wenn sich zwei (oder mehrere) Wellen überlagern, können charakteristische Muster auftreten, die aus dem Zusammenspiel der Maxima und Minima der beiden überlagerten Wellen entstehen. Man fasst diese Erscheinungen unter dem Begriff *Interferenz* zusammen. Im Falle von Licht führt dies dazu, dass sich zwei Strahlen gegenseitig vollkommen auslöschen können, und dass sich die Strahlen nicht wie sonst üblich geradlinig auszubreiten, sondern *gebeugt* werden, d. h. "um die Ecke" zu gehen scheinen.

Während man allgemeine Wellen beliebig überlagern kann, sind bei Licht wegen der sehr kurzen Periodendauer im Bereich von  $10^{-15}$  s nur dann statische Interferenzerscheinungen zu beobachten, wenn die überlagerten Wellen dieselbe Wellenlänge besitzen und *kohärent* sind. Unter Kohärenz versteht man die Eigenschaft, dass die überlagerten Wellen über beobachtbare Zeiträume eine konstante Phasenbeziehung besitzen, also im Zeigerdiagramm einen konstanten Winkel bilden, s. Abb. 2. Für natürliche Lichtquellen lässt sich im Experiment Kohärenz nur dadurch erzielen, dass man einen Lichtstrahl mit sich selbst überlagert, indem man ihn durch ein beugendes Hindernis oder einen Strahlteiler aufspaltet, und nach durchlaufen unterschiedlicher Strecken wieder zusammenführt. Der Grund dafür ist die endliche Länge eines Wellenzugs, so dass sich zwei verschiedene Wellenzüge immer nur für sehr kurze Zeit überlagern lassen. Folglich überlagern sich ständig unterschiedliche Wellenzüge mit veränderlicher Phasenbeziehung, und es entsteht eine gemittelte Überlagerung ohne feste Interferenzerscheinungen.

Im Grunde erhält man für jede beliebige Phasenbeziehung der überlagerten Wellen eine resultierende Welle mit derselben Wellenlänge, deren Phase und Amplitude jedoch von der der beiden ursprünglichen Wellen verschieden sein wird, wie man am Beispiel in Abb. 2 gut sieht. Zwei spezielle Situationen sind aber sowohl für das Verständnis der Interferenz als auch für die experimentelle Beobachtung von besonderer Bedeutung. Überlagert man zum einen zwei Wellen mit einer Phasenverschiebung von einer vollen Periode (oder beliebiger *ganzzahliger* Vielfacher davon,  $n \cdot 2\pi$ ), so addieren sich die beiden Wellen einfach und die resultierende Welle hat die doppelte Amplitude. Diesen Fall nennt man *konstruktive* Interferenz. Er tritt insbesondere immer dann auf, wenn man einen Strahl teilt, und die beiden Teilstrahlen zwei verschiedene Wege laufen lässt, die sich um ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge unterscheiden,  $n\lambda$ , bevor sie wieder überlagert werden. Diese Differenz der Weglänge der beiden Teilstrahlen bezeichnet man als *Gangunterschied*.

Umgekehrt löschen sich die beiden Wellen vollständig aus, wenn sie eine Phasenverschiebung von



*Abbildung 3:* Beispiele zum Huygensschen Prinzip. (a) Elementarwellen entlang einer geradlinigen Wellenfront ergeben wieder dieselbe Welle. (b) Ein idealisierter Doppelspalt liefert die Überlagerung von zwei Elementarwellen, deren Interferenz als Streifenmuster auf einem Schirm (blau) beobachtet werden kann - rechts ist die Intensitätsverteilung am Schirm gezeigt.

einer halben Periode haben (oder beliebige ganzzahlige Vielfache der Periode mehr,  $(n + \frac{1}{2}) \cdot 2\pi$ ), da dann stets die eine Welle in die entgegengesetzte Richtung ausgelenkt ist wie die andere. Dies bezeichnet man als *destruktive* Interferenz, und sie tritt analog zur konstruktiven Interferenz immer dann auf, wenn zwei Strahlen überlagert werden, die einen Gangunterschied haben, der ein *ungeradzahliges* Vielfaches der *halben* Wellenlänge ist,  $(2n + 1)\frac{\lambda}{2}$ . Sollten die beiden überlagerten Wellen nicht dieselbe Amplitude besitzen (z.B. weil die Welle auf einem der beiden Wege an Intensität verloren durch Absorption oder Reflexion), dann löschen sie sich zwar nicht vollständig aus, die Helligkeit nimmt aber dennoch ein deutlich erkennbares Minimum an. Im Experiment sind konstruktive und destruktive Interferenz sehr gut zu beobachten und insbesondere gut zu unterscheiden, daher wird man sich ausschließlich mit diesen beiden Fällen befassen.

### Huygenssches Prinzip

Die Wellen, die uns im Experiment begegnen, sind natürlich keine die idealisierten Sinusfunktionen, die wir bisher bei der Diskussion von Welleneigenschaften und Interferenz betrachtet haben. Licht und Schallwellen breiten sich im dreidimensionalen Raum aus und bilden sog. Wellenfronten, die wir mit Hilfe des *Huygensschen Prinzips* beschreiben. Die Idee dabei ist, dass jeder Punkt im Raum als Ursprung einer *Elementarwelle* aufgefasst wird, welche sich in alle Richtungen gleichmäßig ausbreitet, s. Abb. 3. Die Wellenfront einer solchen Elementarwelle ist daher kugelförmig, d.h. jeder Punkt auf einer Kugel mit beliebigem Radius um den Ursprung der Elementarwelle hat dieselbe Phase. Eine reale Welle setzt sich nun aus der Überlagerung aller dieser Elementarwellen zusammen, so entsteht beispielsweise eine geradlinige Wellenfront wie in Abb. 3 (a) aus der Überlagerung der kugelförmigen Elementarwellen entlang eben dieser Wellenfront, da sich alle Beiträge der einzelnen Elementarwellen aufheben, die nicht parallel zu dieser Wellenfront verlaufen.

### Beugung

Mit Hilfe des Huygensschen Prinzips können wir auch leicht das Phänomen der Beugung am Doppelspalt begreifen. Dazu betrachten wir in Abb. 3 (b) eine ausgedehnte, gerade Wellenfront, welche auf einen Doppelspalt trifft. Die Welle wird fast vollständig von der Wand blockiert, nur an den beiden Spaltöffnungen, die wir hier idealisiert als *punktförmig*, d.h. beliebig schmal ansehen, entstehen neue Wellenfronten aus der Überlagerung der beiden Elementarwellen an diesen Spalten. Fassen wir die durchgezogenen Wellenfronten beispielsweise als Wellenberge auf, so erkennen wir, dass sich die Maxima der beiden Elementarwellen an strahlenförmig von den

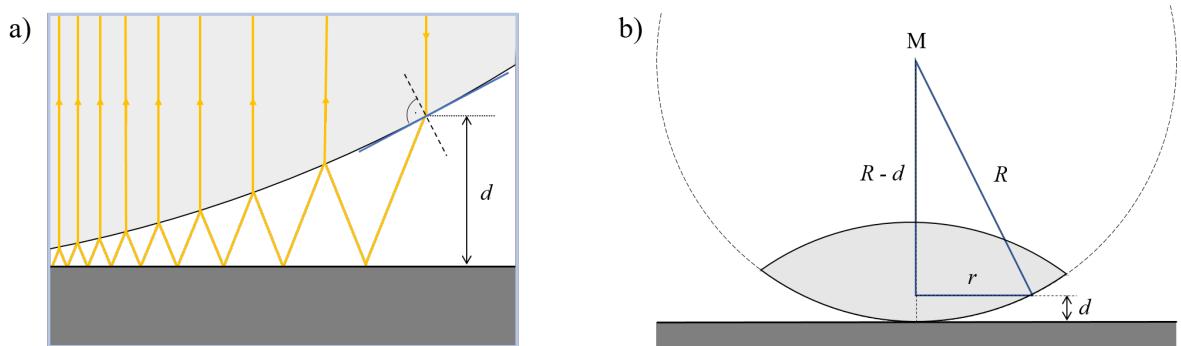


Abbildung 4: a) Entstehung der Newtonschen Ringe durch Vielstrahlinterferenz. b) Die Oberfläche der Linse ist das Segment einer Kugel mit Radius  $R$  um den Mittelpunkt  $M$ ; Bei Erfüllung der Interferenzbedingung tritt bei der Höhe  $d$  des Luftspalts ein Ring mit Radius  $r$  auf.

Spalten nach außen laufenden Orten zu Beugungsmaxima überlagern, in der Skizze angedeutet durch schwarze Strahlen. Das Licht scheint sich also hinter dem Doppelspalt nicht mehr in der Richtung auszubreiten, in der es von links auf den Spalt zugelaufen ist. Daneben beobachten wir zwischen den Orten der Überlagerung von Maxima eine Überlagerung der Maxima der einen Elementarwelle mit den Minima der anderen (angedeutet durch weiße Strahlen), wo sich die beiden Wellen also auslöschen. Platzieren wir nun einen Schirm (in blau gezeigt) in einiger Entfernung hinter den Doppelspalt, so zeigt sich darauf das Beugungsmuster des Doppelspalts mit abwechselnden Streifen aus maximaler Helligkeit und Dunkelheit. Die Intensitätsverteilung des Beugungsmusters am Schirm ist ganz recht gezeigt.

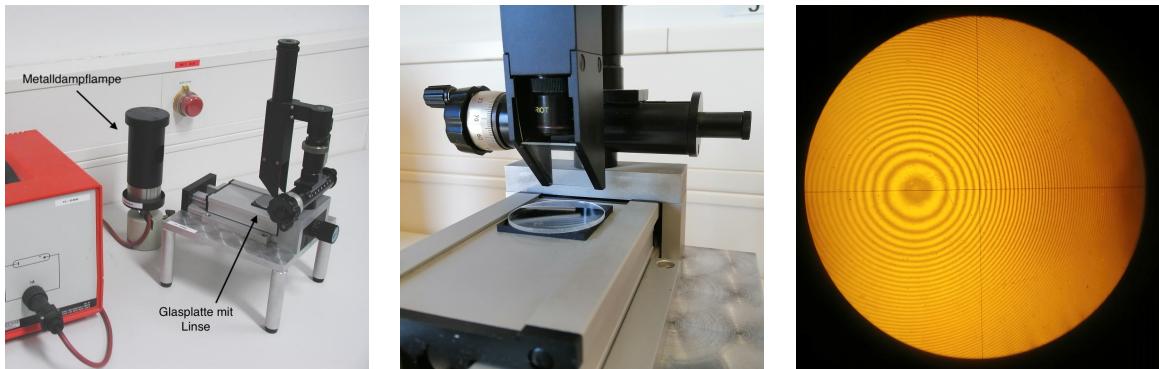
### Newton'sche Ringe

Analog zum Doppelspalt können Interferenzerscheinungen auch bei Überlagerung von mehr als zwei Strahlen entstehen, sofern sie alle kohärent sind. So ergibt sich die Interferenz am Gitter mit  $N$  Spalten ganz natürlich aus dem Doppelspalt. Ein weiteres Beispiel für Vielstrahlinterferenz sind die *Newton'schen Ringe*, die durch Reflexionen an dünnen, transparenten Schichten entstehen. Wir beobachten sie z.B. in den farbigen Schlieren auf Ölpfützen und Seifenblasen, oder wie hier an der gewölbten Oberfläche einer Konvexlinse. Die Interferenz entsteht dabei durch die mehrfache Reflexion des einfallenden Lichts in dem keilförmigen Luftspalt zwischen der Linse und der darunterliegenden Oberfläche, s. Abb. 4 (a). Die Auflagefläche muss dazu plan und (teilweise) reflektierend sein, so dass das Licht wie in der Abbildung gezeigt viele Male zwischen der Linse und der Auflagefläche reflektiert wird.

An der Linsenoberfläche tritt dabei jedes Mal ein Teil des Lichts wieder ins Glas ein, und diese zurück reflektierten Strahlen interferieren schließlich. Der Gangunterschied  $\Delta s$  zwischen diesen Strahlen hängt von der Strecke  $d$  im Luftspalt ab, die jeweils zwei Mal durchlaufen wird,

$$\Delta s = 2d. \quad (1)$$

Streng genommen ändert sich die Höhe dieses Luftspalts für zwei benachbarte Teilstrahlen etwas, was in Abb. 4 (a) zur Verdeutlichung sogar übertrieben dargestellt ist. Da  $d$  aber im Vergleich zum Krümmungsradius  $R$  der Linse sehr klein ist, können wir diese Abweichung ebenso vernachlässigen, wie die geringfügige Änderung des Brechungswinkels zweier benachbarter Strahlen. Zur Berechnung des Gangunterschieds und der sich daraus ergebenden Interferenzbedingung nehmen wir daher eine feste Höhe  $d$  des Luftspalts an, die offensichtlich über die Entfernung  $r$  vom Mittelpunkt der Linse mit ihrem Krümmungsradius  $R$  verknüpft ist, s. Abb. 4 (b).



*Abbildung 5:* (links) Gesamtansicht des Versuchsaufbaus. (Mitte) Der Mikroskopoptibus lässt sich über eine Schraube seitlich verschieben. An seinem unteren Ende befindet sich eine Glasplatte, über welche das Licht von der Seite auf die Linse gespiegelt wird. (rechts) Mit Hilfe des Fadenkreuzes werden die Ringe ausgemessen.

Für die Bestimmung der Interferenzbedingung müssen wir aber noch berücksichtigen, dass das Licht bei der Reflexion an der Auflagefläche wegen der Stetigkeit des elektrischen Feldes einen Phasensprung von  $180^\circ = \pi$  machen muss. Dieser muss zu der Phasenverschiebung zweier benachbarter Teilstrahlen infolge ihres Gangunterschieds  $\Delta\phi_s = 2\pi\frac{\Delta s}{\lambda}$  hinzu addiert werden, so dass man mit Gleichung (1) insgesamt erhält

$$\Delta\phi = 2\pi \left( \frac{2d}{\lambda} + \frac{1}{2} \right). \quad (2)$$

Zudem haben wir uns oben klar gemacht, dass für eine Phasenverschiebung von  $(n + \frac{1}{2}) \cdot 2\pi$  destruktive Interferenz, also Auslöschung auftritt. Wenn wir dies in den Ausdruck (2) einsetzen, erhalten wir als Bedingung für destruktive Interferenz, d. h. *dunkle* Interferenzringe

$$\frac{2d}{\lambda} = n. \quad (3)$$

Wie man in Abb. 4 (b) sieht, lässt sich die Strecke  $d$  über den Radius  $r$  des Interferenzrings und den Krümmungsradius  $R$  der Linse ausdrücken,

$$d = \frac{r^2}{2R}, \quad (4)$$

wobei wir die Näherung  $d \ll R$  gemacht haben, um den Ausdruck zu vereinfachen. Setzen wie dieses Ergebnis in den Ausdruck (3) ein, so erhalten wir schließlich den Ausdruck, der die bekannten bzw. messbaren Größen  $n$ ,  $r$  und  $\lambda$  mit dem zu ermittelnden Krümmungsradius  $R$  in Zusammenhang setzt,

$$r^2 = n\lambda R. \quad (5)$$

## Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist auf dem Foto in Abb. 5 zu sehen. Die wesentlichen Komponenten sind eine Natriumdamplampe und ein Beobachtungsmikroskop, welches an einem Objekttisch befestigt ist, der sich über Schrauben in zwei Richtungen kontrolliert verschieben lässt.

Selbststudium: Machen Sie sich mit dem Strahlengang beim Mikroskop und der grundlegenden Funktionsweise einer Metalldampflampe vertraut. Sie können dazu u. a. die Anleitungen der Praktikumsversuche O-03: Optiklabor bzw. O-05: Spektrometer heranziehen.

Das Licht der Na-Dampflampe fällt seitlich auf eine Glasplatte am unteren Ende des Mikroskopstubus, so dass es senkrecht in Richtung des Objekttisches reflektiert wird. Dieser besteht aus einer geschwärzten Glasplatte, auf der sich die zu untersuchende Linse befindet. Durch die Glasplatte hindurch wird die Linse von oben durch das Mikroskops betrachtet, in dessen Okular sich ein Fadenkreuz befindet, mit dessen Hilfe sich die Radien der Newtonschen Ringe vermessen lassen. Dazu wird das Mikroskop mithilfe eines Schraubenantriebs lateral bewegt. Die Position des Mikroskops kann an einer Skala abgelesen und somit der Radius bzw. Durchmesser der Ringe bestimmt werden.

## Versuchsdurchführung

Warten Sie nach dem Einschalten der Na-Dampflampe zunächst einen Moment bis die Betriebstemperatur erreicht ist und die Lampe ihre volle Helligkeit und Farbe angenommen hat. Vor der Messung muss die Linse so unter dem Mikroskop positioniert werden, dass das Fadenkreuz zentriert ist, um Fehler bei der Bestimmung des Durchmessers der Ringe zu minimieren. Fahren Sie dazu das Fadenkreuz auf einen weit außen liegenden Ring und achten Sie hierbei darauf, dass der senkrechte Draht des Fadenkreuzes tangential an dem Ring anliegt und ihn nicht schneidet. Dies wiederholen Sie auf der gegenüberliegenden Seite. Fahren Sie von nun an wegen des sog. Totgangs im Getriebe der Messschraube das Mikroskop nur noch in einer Richtung.

Die Ringe werden zum Mittelpunkt der Linse hin immer breiter, außerdem ist die Beugungsbedingung im Zentrum der Linse nicht mehr wohldefiniert. Aus diesem Grund lässt sich die Beugungsordnung  $n$  der einzelnen Ringe nicht absolut angeben. Stattdessen misst man im Experiment zwanzig Ringe mit einer *relativen* Beugungsordnung  $n$  zwischen  $n^*$  und  $n^* + 19$ . In der Auswertung wird die Größe  $r_n^2$  über  $n$  grafisch aufgetragen, und aus der Geradensteigung der Krümmungsradius der Linse mittels Gleichung (5) bestimmt. Die stärkste Linie im Spektrum der Na-Dampflampe hat die Wellenlänge  $\lambda = 589 \text{ nm}$ .

## Messung

1. Wählen Sie die erste Linse aus und notieren Sie sich im Messprotokoll die darauf angebrachte Markierung.
2. Legen Sie die Linse auf die Glasplatte und zentrieren Sie das Fadenkreuz (. Wählen Sie dazu einen weit außen liegenden *dunklen* Ring, so dass Sie mindestens 20 Ringe zur Mitte hin deutlich erkennen können.
3. Fahren Sie *von außen* her das Fadenkreuz an diesen Ring heran und protokollieren Sie die Position  $x_{20,(r,l)}$  dieses Rings (rechts oder links, je nachdem, auf welcher Seite Sie beginnen) mit Unsicherheit. Achten Sie darauf, dass Sie das Messprotokoll für diese Seite von unten nach oben ausfüllen, da Sie von größeren zu kleineren Beugungsordnungen gehen.
4. Fahren Sie nun zum nächsten *dunklen* in Richtung des Zentrums der Linse und protokollieren Sie dessen Position mit Unsicherheit.
5. Gehen Sie auf diese Weise weiter vor, bis Sie 20 Ringe auf dieser Seite vermessen haben.

6. Fahren Sie nun in derselben Richtung wie zuvor weiter über das Zentrum der Linse hinweg, bis Sie wieder bei dem Ring angekommen sind, den Sie zuletzt vermessen haben. Hier ist es entscheidend, dass Sie den richtigen Ring finden, da sonst alle Messergebnisse falsch sind. Protokollieren Sie die Position dieses Rings auf dieser Seite in der nächsten Spalte Ihres Messprotokolls und geben Sie die Unsicherheit an.
7. Setzen Sie die Messung fort, bis Sie auf dieser Seite ebenfalls 20 Ringe ausgemessen haben.
8. Wechseln Sie nun die Linse und wiederholen Sie die Messung für diese.

Legen Sie nach der Messung beide Linsen wieder vorsichtig in die Holzkästen und schalten Sie die Lampe aus.

### Auswertung

1. Bestimmen Sie für beide Linsen den Durchmesser der Ringe aus der Differenz der beiden Positionen  $x_{n,l}$  und  $x_{n,r}$  und berechnen Sie daraus die Radien  $r_n$  mit Unsicherheit nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz für alle 20 Ringe.
2. Tragen Sie  $r_n^2$  mit Fehlerbalken als Funktion von  $n$  auf und führen Sie eine grafische Geradenanpassung durch.
3. Berechnen Sie aus der Geradensteigung und deren Unsicherheit die Krümmungsradien der beiden Linsen mit Unsicherheit.

### Diskussion und Fazit

Der Versuchsbericht soll mit der Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse sowie einem Fazit abgeschlossen werden. Welche Erkenntnisse hat dieses Experiment geliefert?