



O02 - Mikroskopie und Lichtbeugung

Version: 12. Oktober 2026

Name:

Datum:

Versuchsziel

Aufbau und Verwendung eines Mikroskops zur Charakterisierung eines Gitters, welches anschließend zur Bestimmung der Wellenlänge von Laserlicht zu nutzen ist.

Themen zur Vorbereitung

Mikroskop: Aufbau, Strahlengang, Vergrößerung, Auflösung und Numerische Apertur
Licht als Welle: Grundgrößen, Interferenz, Superposition, Huygenssches Prinzip,
Beugung am Gitter, Dispersion

Mess- und Auswertungsaufgaben

1. Bauen Sie ein Mikroskop aus zwei Sammellinsen auf, um eine Strichfolie zu betrachten. Bestimmen Sie die Objektivvergrößerung durch den Vergleich zweier gleichzeitig scharfer Abbildungen identischer Strichfolien mit bzw. ohne Objektiv. Berechnen Sie diese zudem unter Verwendung der Bild- und Gegenstandsweite. Vergleichen Sie die Ergebnisse.
2. **Gesamtvergrößerung** Bestimmen Sie die Gesamtvergrößerung des Mikroskops. Von welchen Parametern ist dies abhängig? Maximieren Sie die Gesamtvergrößerung ihres Mikroskops.
3. **Stufengitter** Nutzen Sie die Schieblehre, um die Gitterkonstante g_1 des gröbsten Gitters auszumessen. Mithilfe des Mikroskops bestimmen Sie anschließend die Verhältnisse der Linienabstände benachbarter Gitter 2, 3 und 4, um letztendlich die Gitterkonstante g_4 des feinsten Gitters zu bestimmen. Geben Sie das Ergebnis in m, cm, mm und μm an.
4. **Laserwellenlänge** Nachdem Sie alle Linsen aus dem Strahlengang entfernt haben, strahlen Sie mit dem Laser durch das in Aufgabe 3 charakterisierte Gitter 4. Bestimmen Sie unter Berücksichtigung der Hinweise aus Kap. 4.4 die Wellenlänge des Lasers in nm.
5. **Gitterkonstante** Unter bekannter Wellenlänge des roten Lasers, tauschen Sie das Stufengitter gegen das bereitgestellte Feingitter aus. Wie verändert sich das Beugungsspektrum? Berechnen Sie die Gitterkonstante des Feingitters.
6. **Zusatzaufgabe ohne Auswertung** Welche Veränderung der Positionen der Beugungsmaxima erwarten Sie, wenn Sie den roten Laser gegen einen grünen Laser austauschen?

Sicherheitshinweise

Bei diesem Versuch verwenden Sie einen kontinuierlichen Laser mit einer Leistung von <1 mW. Laser werden in die Klassen 1 (ungefährlich) bis 4 (große Gefahr für Auge und Haut) eingeteilt. Der hier verwendete Laser gehört zu der Klasse 2:

„Laser dieser Klasse sind zwar nicht wirklich sicher, der Augenschutz ist jedoch durch den Lidreflex und andere Abwehrreaktionen sichergestellt. Schaut man bewusst länger in den Strahl oder wird der Reflex z.B. medikamentös unterdrückt, kann eine Schädigung eintreten.“

Jürgen Eichler: Laser und Strahlenschutz, Vieweg 1992, S. 158

Daher gilt:

! Schauen Sie niemals direkt in den Laserstrahl!

! Achten Sie auch auf die Lichtwege reflektierter und gebrochener Strahlen.

! Bei Verwendung des Lasers dürfen sich keine Linsen im Strahlgang befinden.

Eine Nichtbeachtung dieser Sicherheitshinweise führt zum Ausschluss aus dem Kurs.

Vorbereitungsaufgaben

1. Konstruieren Sie den Strahlengang an einer dünnen Sammellinse, wenn die Gegenstandsweite doppelt so groß wie die Brennweite der Linse ist. Beschriften Sie die genutzten Strahlen und notieren Sie, ob die Abbildung reell oder virtuell, aufrecht oder umgekehrt sowie verkleinert oder vergrößert ist.
2. Fügen Sie in ihren Grundlagenteil, spätestens aber hier, den Strahlengang eines Mikroskops, bestehend aus zwei dünnen Sammellinsen, ein. Beachten Sie, dass sich der Gegenstand (knapp) außerhalb der einfachen Brennweite des Objektivs und dessen Zwischenbild (knapp) innerhalb der Brennweite des Okulars befinden sollte. Kennzeichnen Sie neben Gegenstand, Zwischenbild, Bild und den Brennpunkten der Sammellinsen auch die Tubuslänge.
3. Berechnen Sie den Winkel des ersten Beugungsmaximums, wenn Licht der Wellenlänge $\lambda = 650$ nm auf ein Gitter mit der Gitterkonstanten $g = 1$ μ m trifft.
Wie groß ist der Abstand zwischen dem nullten und dem ersten Beugungsmaximum, wenn das Gitter 10 cm vor dem Schirm positioniert ist?

1. Mikroskopie

1.1. Abbildungen mittels Linsen

Ein optisches Mikroskop ist ein abbildendes System zur Vergrößerung kleiner Strukturen mittels sichtbaren Lichts. Es besteht im einfachsten Fall neben einer Lichtquelle aus zwei hintereinandergeschalteten Sammellinsen: dem Objektiv und dem Okular.

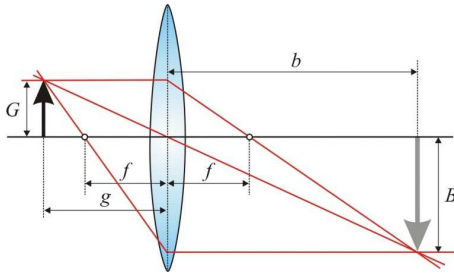


Abb. 1: Strahlengang am Objektiv. Der abzubildende Gegenstand befindet sich außerhalb der einfachen Brennweite der Linse.

Das Objektiv erzeugt ein reelles, vergrößertes Zwischenbild des Objekts, indem der zu untersuchende Gegenstand (knapp) außerhalb der einfachen Brennweite f der Sammellinse positioniert wird (Bild 1). Das reelle Zwischenbild befindet sich innerhalb der einfachen Brennweite des Okulars und erzeugt ein virtuelles Bild, welches mit dem Auge wahrgenommen werden kann (Bild 2).

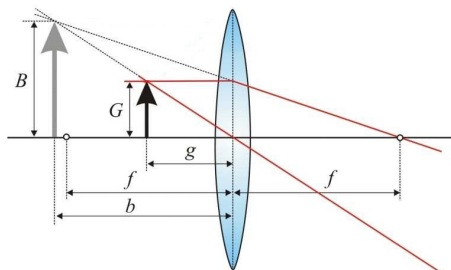


Abb. 2: Strahlengang am Okular. Der abzubildende Gegenstand (bzw. das abzubildende Zwischenbild) befindet sich innerhalb der einfachen Brennweite der Linse.

Die Bildgrößen B sind in beiden Fällen größer als die Gegenstandsgrößen G . Um dies zu erreichen, sind insbesondere die Gegenstands- und Bildweiten g bzw. b , also die Positionierung der zu untersuchenden Struktur und dessen

Abbildung in Bezug auf die Linsen und dessen Brennweiten relevant.

1.2. Vergrößerung

Je näher das Objekt bzw. das Zwischenbild an den Brennpunkten der Linsen positioniert ist, desto stärker ist die Vergrößerung. Befindet sich der Gegenstand bzw. das Zwischenbild jedoch genau im Brennpunkt, entsteht kein Bild. Die Konstruktionsstrahlen verlaufen parallel. Dennoch wird eine Positionierung des Zwischenbildes sehr nah am Brennpunkt des Okulars angestrebt, da sich die größtmögliche Vergrößerung ergibt. Zudem ist es mithilfe der Linsen im Auge möglich die (nahezu) parallel einfallenden Lichtstrahlen auf der Netzhaut abzubilden. Die Gesamtvergrößerung V des Mikroskops ergibt sich aus dem Produkt der einzelnen Vergrößerungen der beiden Sammellinsen:

$$V = V_{\text{Ob}} \cdot V_{\text{Ok}} \quad (1)$$

Dies erlaubt es die Vergrößerung der Linsen unabhängig voneinander zu betrachten. Allgemein ist der Betrag der Vergrößerung einer Linse durch das Verhältnis von Bild- B zu Gegenstandsgröße G gegeben:

$$V_{\text{Linse}} = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung der Linsengleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (3)$$

ergibt sich für das Objektiv:

$$V_{\text{Ob}} = \frac{b_{\text{Ob}} - f_{\text{Ob}}}{f_{\text{Ob}}} \approx \frac{t}{f_{\text{Ob}}} \quad (4)$$

wobei bei einer Erzeugung des Zwischenbildes circa im Brennpunkt des Okulars gilt, dass der Term $b_{\text{Obj}} - f_{\text{Obj}}$ der optischen Tubuslänge t entspricht, welche den Abstand der Brennpunkte der beiden Sammellinsen voneinander bezeichnet.

Beim Okular, welches sich wie eine Lupe beschreiben lässt, ergibt sich die Vergrößerung aus der Normsehweite $s_0 = 25 \text{ cm}$ und dessen Brennweite (Vgl. A)

$$V_{\text{Ok}} \approx \frac{s_0}{f_{\text{Ok}}} = \frac{25 \text{ cm}}{f_{\text{Ok}}} \quad (5)$$

und damit die Gesamtvergrößerung eines Mikroskops zu

$$V \approx \frac{t \cdot s_0}{f_{\text{Ob}} \cdot f_{\text{Ok}}} \quad (6)$$

1.3. Grenzen der Lichtmikroskopie

Neben der Vergrößerung eines Mikroskops ist dessen Auflösungsvermögen AV von großem Interesse. Dieses ist definiert als der Kehrwert des kleinsten Abstands d zweier Strukturen, die noch getrennt wahrgenommen werden können:

$$AV = \frac{1}{d} \quad (7)$$

Dabei ist das Auflösungsvermögen eines Mikroskops im Wesentlichen durch das Auflösungsvermögen des Objektivs bestimmt. Struktureinzelheiten, die durch das Objektiv nicht aufgelöst werden, können auch durch beliebig vergrößernde Okulare nicht sichtbar gemacht werden.

Um das Auflösungsvermögen zu maximieren, muss möglichst viel Licht von einer Struktur eines Präparates in das Objektiv gelangen. Dies wird zum Einen durch den Öffnungswinkel β des Objektivs und zum Anderen durch den Brechungsindex n des Mediums zwischen Objekt und Objektiv bestimmt. Das Einbringen eines Immersionsöls mit einem größeren Brechungsindex als Luft in diesen Zwischenraum sorgt dafür, dass auch stärker geneigte Lichtstrahlen noch in das Objektiv eindringen (Abb. 3).

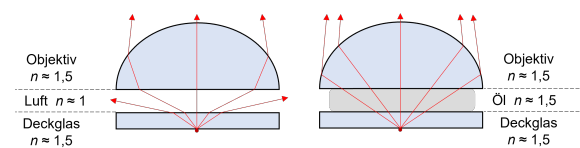


Abb. 3: Strahlengänge ohne (links) und mit (rechts) Immersionsöl.

Zusätzlich wird das Auflösungsvermögen durch die Wellennatur des Lichts (Vgl. Kap. 2), insbesondere durch die Beugung, begrenzt. Strukturen erzeugen keine beliebig scharfen Bildpunkte, sondern Beugungsbilder, dessen Überlagerung sich ab einem gewissen Abstand

mehrerer Strukturen nicht mehr hinreichend unterscheiden lassen (Abb. 4).

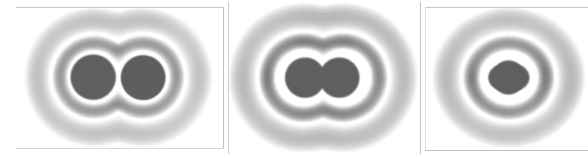


Abb. 4: Abbildungen zweier Bildpunkte. Links: gut aufgelöst, Mitte: noch aufgelöst, Rechts: nicht aufgelöst.

Zusammenfassend gilt:

$$AV = \frac{n \cdot \sin(\beta)}{\lambda} = \frac{N_A}{\lambda} \quad (8)$$

wobei λ die Wellenlänge des Lichts ist und der Term $n \cdot \sin(\beta)$ als Numerische Apertur N_A zusammengefasst wird.

Für Mikroskope mit einem Objektivöffnungswinkel von $\beta = 70^\circ$ und Luft zwischen dem Objekt und Objektiv ($n \approx 1$) beträgt die Numerische Apertur $N_A \approx 0,95$ und damit entspricht der kleinste noch auflösbare Abstand zweier Strukturen in etwa der Wellenlänge des genutzten Lichts. Um näher beieinander liegende Strukturen voneinander unterscheiden zu können, müssen kleinere Wellenlängen oder andere Messprinzipien verwendet werden.

2. Licht als Welle

Eine Welle bezeichnet die räumliche Ausbreitung einer Schwingung, also der zeitlich periodischen Veränderung mindestens einer physikalischen Größe. Im Fall von Licht schwingen ein elektrisches und magnetisches Feld senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Dies wird als Transversalwelle bezeichnet. Entscheidende Größen zur Beschreibung einer Welle sind die maximale Auslenkung der Schwingung, die Amplitude A , sowie die Wellenlänge λ , welche die räumlich überbrückte Distanz angibt, bis zu der eine vollständige Schwingung durchlaufen ist (Abb. 5).

Die sogenannte Wellenoptik behandelt Phänomene der Lichtausbreitung, welche nicht mit Modellen der geradlinigen Ausbreitung des Lichts in optisch homogenen Medien erklärt werden können. Ein typisches Phänomen der

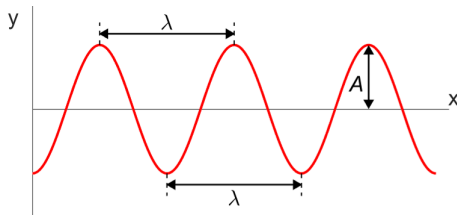


Abb. 5: Sinusförmige Welle zur Verdeutlichung von Amplitude A und Wellenlänge λ .

Wellenoptik ist die Beugung. Sie tritt auf, wenn optische Hindernisse wie Blenden, Spalte und Kanten in der Größenordnung der Wellenlänge im Lichtweg sind (Abb. 6). Das Licht (oder allgemeiner: Jede Art von Wellen) kann dadurch in Raumbereiche vordringen, die auf geradem Wege nicht erreichbar wären.

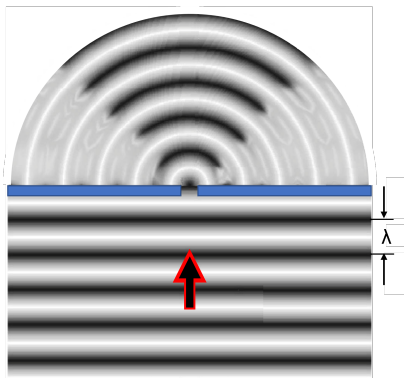


Abb. 6: Zweidimensionale Beugung einer Welle an einem Spalt.

Die Lichtbeugung kann nach dem Prinzip von Christiaan Huygens (1629–1695) erklärt werden. Danach ist jeder Punkt einer Wellenfront in einem optisch transparenten homogenen Medium Ausgangspunkt einer sich allseitig ausbreitenden Kugelwelle, einer sog. Elementarwelle. Die Einhüllende aller Elementarwellen bildet dann eine neue Wellenfront. Wird die Wellenausbreitung durch einen Spalt auf nahezu einen Punkt begrenzt, lässt sich die (im Zweidimensionalen) die kreisförmige Ausbreitung beobachten. Die Einhüllende einer geraden Wellenfront ist hingegen wieder eine gerade Wellenfront (Abb. 7).

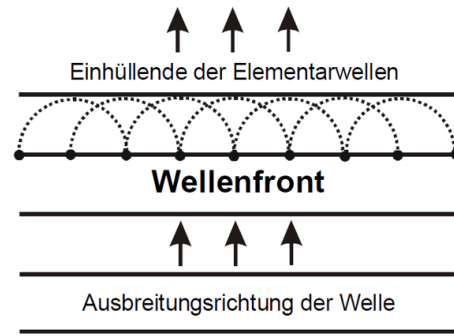


Abb. 7: Darstellung des Huygenschen Prinzips an einer geraden Wellenfront.

2.1. Interferenz

Die Überlagerung von zwei oder mehr Wellen an einem Ort nennt man Interferenz. Die resultierende Welle ergibt sich nach dem Superpositionsprinzip dabei aus der Summe der Auslenkungen der einzelnen Wellen, unabhängig von deren Ausbreitungsrichtungen. Die linke Spalte in Abbildung 8 verdeutlicht dies.

Oben sind in rot und blau zwei Wellen gleicher Wellenlänge und Amplitude zu sehen, die um $1/3$ ihrer Wellenlänge gegeneinander verschoben sind, also einen Gangunterschied von $\Delta s = 1/3\lambda$ aufweisen. Darunter ist in lila die resultierende Welle, als Addition der Auslenkungen der Einzelwellen an jedem Ort, abgebildet. Sie besitzt dieselbe Wellenlänge und sogar dieselbe Amplitude. Jedoch befinden sich diese Maxima an anderen Orten.

Die Spezialfälle der konstruktiven und destruktiven Interferenz sind in Abb. 8 mittig und rechts abgebildet. Bei konstruktiver Interferenz beträgt der Gangunterschied der beiden Einzelwellen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge

$$\Delta s = m\lambda \quad \text{mit} \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

also zum Beispiel $\Delta s = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$. Die beiden Wellen liegen direkt übereinander. Die resultierende Welle besitzt die gleiche Wellenlänge, hat aber eine verdoppelte Amplitude.

Destruktive Interferenz ergibt sich hingegen bei Gangunterschieden, die einem ungradzahligem Vielfachen der halben Wellenlänge entsprechen. Zum Beispiel $\Delta s = 1/2\lambda, 3/2\lambda, 5/2\lambda, \dots$. Ma-

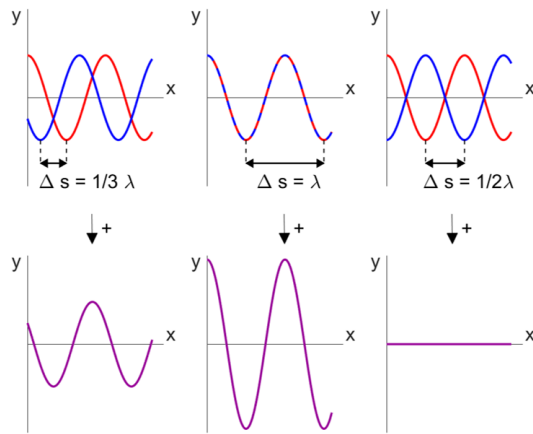


Abb. 8: Oben: Zwei gleichartige Sinuswellen in rot und blau mit den Gangunterschieden $1/3\lambda$ (links), λ (mittig) und $1/2\lambda$ (rechts) breiten sich entlang der x-Achse aus. Unten: Nach dem Superpositionsprinzip resultierende Wellen.

thematisch kann dies auch wie folgt geschrieben werden:

$$\Delta s = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad \text{mit} \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

Die Amplitude der resultierenden Welle beträgt dann "0".

2.2. Lichtbeugung am Gitter

Trifft das Licht einer Lichtquelle nicht nur auf einen einzigen Spalt, wie in Abb. 6, links, dargestellt, sondern auf eine Vielzahl von äquidistanten Spalten, einem Gitter, so kommt es zur Interferenz der an jedem Durchgang gebildeten Wellen. Das Interferenzmuster auf einem Beobachtungsschirm besteht aus schmalen Maxima, also hellen Stellen, und größeren dunklen Bereichen (Abb. 9) und ist damit kein direktes Abbild der Spaltabstände des Gitters, welche als Gitterkonstante g bezeichnet wird.

Um zu überprüfen, ob ein Punkt P auf dem weit entfernten Beobachtungsschirm hell oder dunkel ist, gilt es den Gangunterschied der von den einzelnen Spalten ankommenden Lichtwellen zu beachten. Da sich der Weg von benachbarten Gitterspalten stets um einen festen Weglängenunterschied unterscheidet, überlagern sich am Punkt P Wellen mit stetig wach-

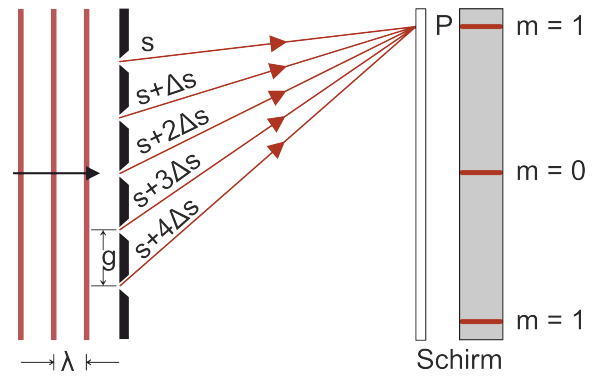


Abb. 9: Eine von links einlaufende, monochromatische Welle trifft auf ein Gitter. An jeder Öffnung kommt es zur Bildung einer neuen Elementarwelle, die sich im anschließenden Raumbereich überlagern und auf einen Beobachtungsschirm treffen. Nur jene Anteile der Elementarwellen sind eingezeichnet, die sich im Punkt P des Schirms treffen. Der Schirm ist zusätzlich zur Draufsicht auch von vorn abgebildet (rechts), um das Beugungsmuster der nullten und ersten Ordnung zu verdeutlichen.

senden Gangunterschieden $\Delta s, 2\Delta s, 3\Delta s, \dots$. Löscht sich dabei beispielsweise der Lichtanteil vom ersten Spalt in Abb. 9 mit dem Lichtanteil des vierten Spalt aus, so gilt dies auch für die Interferenz der Lichtanteile aus dem zweiten und fünften Spalt, da diese den gleichen Gangunterschied aufweisen. Dieser Prozess setzt sich fort, so dass der Punkt P dunkel bleibt. Ein heller Punkt ergibt sich nur, wenn sich die Lichtwellen aller jeweils benachbarten Spalte eines Gitters konstruktiv überlagern, also der Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der verwendeten Wellenlänge ist $\Delta s = m\lambda$ mit $m = 0, 1, 2, \dots$ (Vgl. Gl. 9). Dabei nennt man die durch $m = 0, 1, 2$ gebildeten hellen Punkte die Maxima nullter, erster und zweiter Ordnung.

In Abb. 9 könnte man aufgrund der verzerrten Darstellung annehmen, dass die Lichtanteile der einzelnen Spalte unter deutlich verschiedenen Winkeln am Punkt P ankommen. Tatsächlich ist die Gitterkonstante jedoch sehr klein gegenüber dem Abstand zwischen Gitter und Schirm, so dass von näherungsweise parallelem Licht unter dem Beugungswinkel α vom

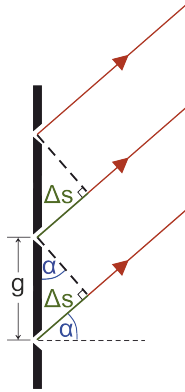


Abb. 10: Lichtanteile (rot), die sich nach einem Gitter zu einem gemeinsamen Punkt auf einem weit entfernten Beobachtungsschirm bewegen, bewegen sich näherungsweise parallel unter dem Winkel α (blau). Lichtanteile benachbarter Gitteröffnungen weisen dabei stets den Gangunterschied Δs auf (grün).

Gitter ausgegangen werden kann. Abbildung 10 verdeutlicht dies. Zudem ist in Abb. 10 der konstante Gangunterschied Δs benachbarter Lichtwege in grün hervorgehoben. Dieser wird in den rechtwinkligen Dreiecken bestimmt zu:

$$\Delta s = g \cdot \sin(\alpha) \quad . \quad (11)$$

Durch Gleichsetzen der Beziehungen 9 und 11 lässt sich der Winkel der Beugungsmaxima bestimmen:

$$\begin{aligned} m \cdot \lambda &= g \cdot \sin(\alpha) \\ \text{mit } m &= 0, 1, 2, \dots \quad . \end{aligned} \quad (12)$$

Es ist ersichtlich, dass neben der Wahl der Gitterkonstanten, auch die verwendete Wellenlänge die Winkel der Beugungsmaxima beeinflusst. Die Beugungsbilder von rotem und grünem Licht am selben Gitter sind nicht deckungsgleich. Diese Aufspaltung der Wellenlängen nennt man Dispersion. Sie kann neben der Verwendung eines Gitters auch bei der Nutzung eines Prismas beobachtet werden, ist dort jedoch auf die wellenlängenabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im Prismenmaterial zurückzuführen.

3. Versuchsapparatur

Die Versuchsapparatur ist in Abb. 11 dargestellt. Die optische Bank bildet eine Winkelschiene, auf der die optischen Elemente in Abständen bis etwa 1 m angeordnet werden können. Neben der Papierskala auf der optischen Bank stehen auch Stahllineale und ein Messschieber für Längenmessungen zur Verfügung. Die verschiedenen optischen Elemente (z.B. Lichtquellen und Linsen) haben zumeist ein zylinderförmiges Gehäuse, so dass sie durch einfaches Auflegen auf die Winkelschiene auf die optische Achse ausgerichtet sind. Zusätzlich sind mehrere Gitter in Diarahmen bereitgestellt. Diese können über einen Sockel mit einer Winkelskala plziert werden. Ein Beobachtungsschirm steht zur Verfügung, der auf einer Seite mit Millimeterpapier für (grobe) Längenmessungen versehen ist. Als Lichtquellen dient je nach Messaufgabe eine Glühlampe oder eine Laserdiode. Die Betriebsspannung wird für beide Quellen von der selben Spannungsversorgung erzeugt. Bei der Laserdiode ist auf die Polarität zu achten.

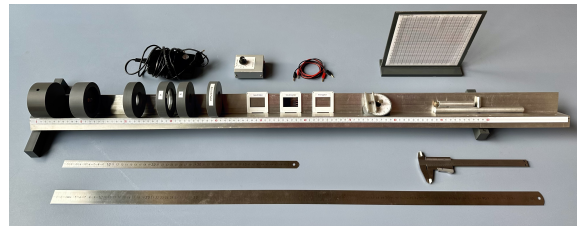


Abb. 11: Materialien zur Versuchsdurchführung.

Für den Aufbau des Mikroskops wird die Glühlampe als Lichtquelle verwendet und die Schiene kann einseitig aufgebockt werden. Bevor die Laserdiode zur Erzeugung eines Beugungsspektrums genutzt wird, sind alle Linsen aus dem Strahlengang zu entfernen und die einseitige Erhöhung der Winkelschiene zurückzubauen.

4. Hinweise zur Durchführung

4.1. Aufbau des Mikroskops

Die Schiene kann einseitig aufgebockt werden. Zudem steht eine Blende (ein Rundhalter ohne Dia oder Linse) bereit. Beides dient dazu, mit entspanntem Auge durch das Mikroskop schauen zu können. Eine Positionierung der Schiene zum Tischeinde ist hilfreich.

Beginnen Sie den Aufbau mit der Blende am offenen Ende der Schiene. Fügen Sie dann die Linsen und das Strichfoliendia, gehalten auf der Winkelkreisscheibe, in den Strahlengang ein (Abb. 12). Da sich die Strichfolie nur knapp außerhalb der Brennweite des Objektivs befinden soll, diese aber nur wenige Zentimeter beträgt, nutzen Sie bitte die exzentrische Bohrung der Winkelkreisscheibe zur Halterung des Dias. Die Glühlampe ist zunächst mit geringer Helligkeit zu betreiben. Die Leuchtstärke kann später angepasst werden.

Um ein scharfes Abbild zu erreichen, verschieben Sie zunächst das Objektiv. Anschließend sollten sie die Position des Okulars großräumig variieren, um die Ansicht zu optimieren.

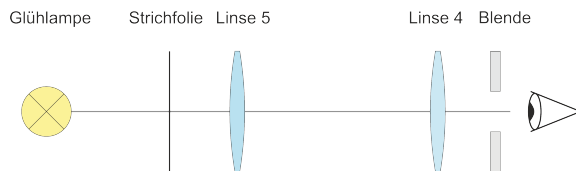


Abb. 12: Mikroskopaufbau.

4.2. Vergleich der Strichfolien

Setzen Sie die zweite, identische Folie (im Rundhalter) zwischen Objektiv und Okular derart ein, dass beide Strichfolien gleichzeitig scharf abgebildet werden. Überlegen Sie sich, warum dies nur an einer Position möglich ist. Die Folie im Rundhalter wird nur durch das Okular vergrößert wahrgenommen, die Strichfolie auf der Winkelkreisscheibe wird zusätzlich zur (identischen) Okularvergrößerung durch das Objektiv vergrößert. Durch den Vergleich der Strichabstände der beiden Folien können Sie die Vergrößerung des Objektivs bestimmen.

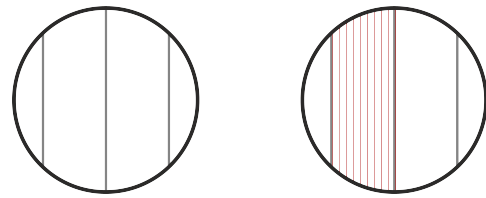


Abb. 13: Vergleich der Strichfolien.

Abb. 13 zeigt links die Ansicht der Strichfolie, die durch Objektiv und Okular vergrößert dargestellt ist. Rechts ist in rot zusätzlich ein Teil der Strichfolie abgebildet, die nur über das Objektiv vergrößert wird. Innerhalb eines Abstands zweier benachbarter Striche auf der durch beide Linsen vergrößerten Strichfolie können 9 Strichabstände der zweiten Folie gezählt werden. Das Objektiv hat dann eine Vergrößerung um den Faktor 9 verursacht.

4.3. Bestimmung der Gitterkonstanten des Stufengitters

Messen Sie die Gitterkonstante des größten Gitters g_1 vorsichtig unter Nutzung eines Messschiebers aus. Beachten Sie, dass eine Gitterkonstante dabei stets exakt einen lichtdurchlässigen sowie einen benachbarten, lichtundurchlässigen Teil des Gitters umfasst. Um die Gitterkonstanten der drei feineren Gitter (g_2 bis g_4) zu ermitteln, bestimmen Sie mit dem Auge oder dem Mikroskop die Verhältnisse der Linienabstände benachbarter Gitterbereiche. Umfasst der Gitterabstand g_1 beispielsweise wie in Abb. 14 dargestellt je zwei lichtdurchlässige sowie lichtundurchlässige Teile des zweiten Gitters, so ist dessen Gitterkonstante nur halb so groß, wie die des ersten Gitters ($g_2 = g_1/2$).

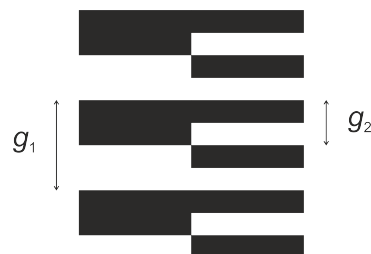


Abb. 14: Bestimmung der Gitterkonstanten.

4.4. Bestimmung der Laserwellenlänge

Das Laserlicht wird nach dem Durchgang durch das Gitter G4 von einem Schirm aufgefangen (Abb. 15). Durch Messung der Abstände a zwischen Gitter und Schirm sowie b zwischen der nullten und ersten Beugungsordnung können Sie den Beugungswinkel α ermitteln. Dieser dient dann bei bekannter Gitterkonstante g_4 zur Ermittlung der Laserwellenlänge nach Gl. 12. Bei einem senkrechten Beugungsmuster auf dem Schirm ist das Gitter um 90 Grad zu drehen. Dieser Aufbau kann unter bekannter Wellenlänge des Lichts auch genutzt werden, um die Gitterkonstante eines unbekannten Gitters zu bestimmen.

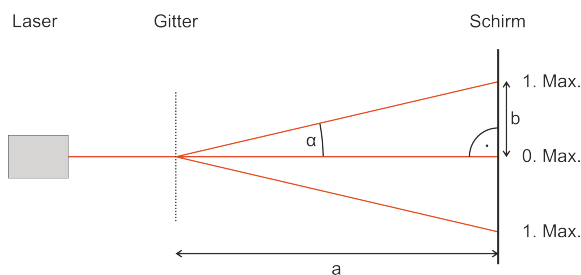


Abb. 15: Aufbau zur Bestimmung der Laserwellenlänge.

A. Vergrößerung einer Lupe

Ein normales menschliches Auge kann ein scharfes Bild eines Gegenstandes erzeugen, wenn sich das Objekt irgendwo zwischen dem unendlichen und dem sogenannten Nahpunkt P_n befindet (Abb. 16). Die Lage des Nahpunktes ist altersabhängig und individuell verschieden, wird aber standardisiert in einem Abstand von $s_0 = 25 \text{ cm}$ vom Auge entfernt festgelegt.

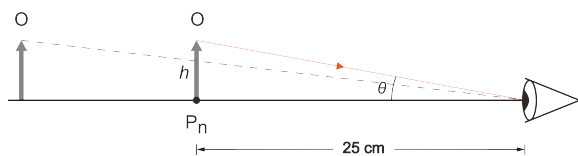


Abb. 16: Beobachtung eines Objekts in verschiedenen Abständen vom Auge. Im Nahpunkt P_n wird die größte, scharfe Abbildung erzeugt.

Die Größe des Bildes, welches im Auge erzeugt

wird, hängt von dem Winkel ab, den das Objekt im Blickfeld überstreicht. Je näher das Objekt dem Auge kommt, desto größer wird der Beobachtungswinkel und desto mehr Details sind erkennbar. Die maximale Bildgröße bei scharfer Abbildung ergibt sich daher, wenn sich ein Objekt O mit der Höhe h unter dem Blickwinkel θ im Nahpunkt des menschlichen Auges befindet. Objekte in geringerem Abstand werden verschwommen wahrgenommen.

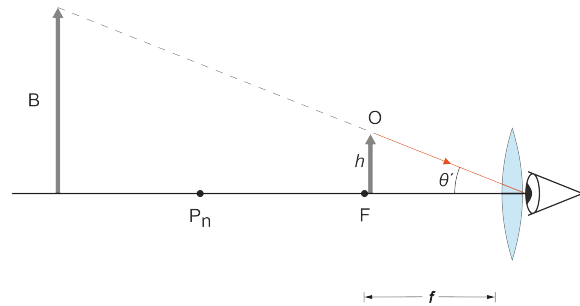


Abb. 17: Vergrößerte, scharfe Abbildung eines Objekts bei Verwendung einer Lupe nah am Auge.

Um eine weitere Vergrößerung zu erreichen, kann eine Sammellinse derart zwischen dem Auge und dem Objekt eingebracht werden, dass sich das Objekt knapp innerhalb der einfachen Brennweite der Linse befindet (Abb. 17). Die virtuelle, aufrechte und vergrößerte Abbildung dieser als Lupe genutzten Sammellinse wird vom Linsensystem des Auges unter dem Winkel θ' erfasst, wobei $\theta' > \theta$ ist. Ist das erzeugte Bild weiter entfernt als der Nahpunkt, ist es scharf sichtbar.

Die Winkelvergrößerung V_θ durch die Sammellinse ergibt sich unter Verwendung der Kleinwinkelnäherung zu

$$V_\theta = \frac{\theta'}{\theta} \approx \frac{\tan(\theta')}{\tan(\theta)} \approx \frac{\frac{h}{f}}{\frac{h}{25 \text{ cm}}} \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (13)$$

Literatur

D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker. *Fundamentals of Physics*. Wiley-VCH, 6th ed. edition, 1998.

V. Harms. *Physik für Mediziner und Pharmazeuten*. Harms Verlag, 20. edition, 2022.