

B-Praktikum

Fabian Haneder

09.11.2016

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Optische Spektroskopie | 5 |
| 1.1 | Vorbereitung | 5 |
| 1.2 | Durchführung | 8 |
| 1.2.1 | Allgemeine Hinweise | 8 |
| 1.2.2 | Einführende Versuche | 9 |
| 1.2.3 | Erzeugung verschiedener Farbtemperaturen mit einem Glühlämpchen | 11 |
| 1.2.4 | Auswertung des Sonnenspektrums | 11 |
| 1.2.5 | Bestimmung chemischer Elemente | 11 |
| 1.2.6 | Additive Farbmischung | 12 |
| 2 | Lichtbeugung an Spalt und Gitter | 15 |
| 2.1 | Vorbereitung | 15 |
| 2.2 | Durchführung | 18 |
| 2.2.1 | Beugungsbild des Einfachspaltes | 18 |
| 2.2.2 | Beugungsbild des Doppelspaltes | 19 |
| 2.2.3 | Beugungsbild eines optischen Gitters | 19 |
| 3 | Optische Geräte | 21 |
| 3.1 | Fragen zur Vorbereitung | 22 |
| 3.2 | Durchführung | 26 |
| 3.2.1 | Lupe | 26 |
| 3.2.2 | Astronomisches Fernrohr | 26 |
| 3.2.3 | Terrestrisches Fernrohr | 27 |
| 3.2.4 | Holländisches Fernrohr | 27 |
| 3.2.5 | Spiegelteleskop | 27 |
| 3.2.6 | Diaprojektor | 27 |
| 3.2.7 | Mikroskop | 28 |
| 4 | Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums | 29 |
| 4.1 | Vorbereitung | 29 |
| 4.2 | Durchführung | 32 |
| 4.2.1 | Farbfilter | 32 |
| 4.2.2 | Bestimmung der Wellenlänge der LEDs | 32 |
| 4.2.3 | Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums | 32 |
| 5 | Gekoppelte Pendel | 35 |
| 5.1 | Fragen zur Vorbereitung | 36 |
| 5.2 | Durchführung | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6 | Spezifische Ladung e/m des Elektrons | 39 |
| 6.1 | Vorbereitung | 39 |
| 6.2 | Durchführung | 41 |
| 6.2.1 | Thomson-Röhre | 41 |
| 6.2.2 | Doppelstrahlröhre | 43 |

1 Optische Spektroskopie

Im Jahr 1835 behauptete einst der französische Philosoph Auguste Comte, man würde nie etwas über die chemische Zusammensetzung der Sonne und der Sterne erfahren. Bereits 33 Jahre später entdeckten Sir Norman Lockyer und Pierre Janssen ein bislang unbekanntes Element in der Sonne, das sie Helium nannten. Möglich war ihnen dies durch den Fortschritt der Spektroskopie, in die in diesem Versuch eingeführt werden soll.

Unter Spektroskopie versteht man physikalische Methoden, die dazu benutzt werden, elektromagnetische Strahlung und, gerade zu Anfang, vor allem sichtbares Licht nach einer bestimmten Eigenschaft wie der Wellenlänge zu zerlegen. Außer zur Untersuchung von Himmelskörpern können diese Methoden auch verwendet werden, um mittels Spektralanalyse oder Massenspektrometrie die chemische Zusammensetzung von unbekannten Proben sehr genau zu bestimmen.

Aber nicht nur die Chemie, sondern auch die Physik hat durch Spektroskopie signifikante Fortschritte gemacht. So findet die Entwicklung der Atomphysik und Quantenmechanik ihren Ausgangspunkt in der Beobachtung von Linienspektren verschiedener Atome und Moleküle, und auch Naturgesetze und -konstanten konnten durch spektroskopische Methoden untersucht werden.

In diesem Versuch soll, nachdem sich zunächst mit den zur Durchführung notwendigen Programmen und Analysemethoden vertraut gemacht wurde, das Sonnenspektrum ausgewertet werden. Zudem soll das für die Strahlung einer Glühlampe verantwortliche Element identifiziert und schließlich die sogenannte additive Farbmischung untersucht werden.

1.1 Vorbereitung

1. Wozu wird das Prinzip der Beugung in einem Spektrometer benötigt?

Unterschiedliche Wellenlängen werden unterschiedlich stark gebeugt bzw. gebrochen, wodurch die Intensitätsmaxima unterschiedlicher Farben an unterschiedlichen Orten auftreten.

2. Welche Vorteile hat ein Beugungsgitter im Vergleich zu einem Doppelspalt? Ändert sich die Lage der Maxima mit zunehmender Spaltanzahl?

Bei einem Beugungsgitter lässt sich eine erheblich höhere Genauigkeit erzielen, da die Intensitätsmaxima deutlich schmaler und höher sind. So berechnet sich beispielsweise die Fußpunktbreite wie folgt: $\Delta\beta = \lambda/N \cdot d$

Hierbei ist N die Spaltanzahl und d der Spaltabstand. Mehr Spalten bedeutet also höhere Genauigkeit. Die Lage der Maxima ändert sich allerdings nicht.

1 Optische Spektroskopie

3. Beschreiben Sie das Spektrum eines Temperaturstrahlers und einer Gasentladungslampe.

Temperaturstrahler strahlen stets ein kontinuierliches Spektrum ab, dessen Intensitätsmaximum bei Raumtemperatur im Normalfall außerhalb des sichtbaren Bereichs liegt. Wird die Temperatur erhöht, so verschiebt sich das Maximum in den sichtbaren Bereich und dort nach und nach von Rot über Gelb bis hin zu Blau. Gasentladungslampen hingegen erzeugen ein Spektrum, bei dem die Maxima deutlich ausgeprägter auftreten, als beim kontinuierlichen Spektrum des Temperaturstrahlers. So kann zum Beispiel mit Natriumdampf-Lampen nahezu monochromatisches Licht erzeugt werden, lediglich die Bewegung der Natriumatome im heißen Dampf führt über den Dopplereffekt zur geringfügigen Verbreiterung der Bandbreite des emittierten Lichts.

4. Wie können mit Hilfe eines Spektrometers die chemischen Elemente der Erd- und Sonnenatmosphäre bestimmt werden? Wie können diese der jeweiligen Atmosphäre zugeordnet werden?

Die Elemente der Erd- und Sonnenatmosphäre können durch einen Vergleich des Spektrums des Sonnenlichts mit bereits bekannten Emissionslinien der einzelnen Elemente bestimmt werden. Eine Zuordnung könnte etwa dadurch erfolgen, dass versucht wird, einen der Faktoren zu eliminieren, indem z.B. von einem Satelliten aufgefangenes Licht analysiert wird.

5. Welche Temperatur (in Kelvin) besitzt die Sonnenoberfläche? Skizzieren Sie den Intensitätsverlauf eines schwarzen Körpers mit dieser Temperatur und kennzeichnen Sie die Strahldichte des sichtbaren Bereichs.

Hierzu benötigt man die Formeln für die spektrale Strahldichte und das Wien'sche Verschiebungsgesetz:

$$L_{S,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1.1)$$

$$\lambda_{\max} T = 2.8978 \cdot 10^{-3} \text{ m K} \quad (1.2)$$

mit den Konstanten

$$c_1 = 2\pi h c_0^2 = 3.7418 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$c_2 = h c_0 k^{-1} = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$$

Die Sonnenoberfläche besitzt eine Temperatur von $T = 5777 \text{ K}$. Damit erreicht die Intensitätsverteilung ihr Maximum bei $\lambda_{\max} = 5.016 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Dies entspricht der Farbe Hellgrün. (Für Abbildung s. [hier](#))

6. Wie hoch müsste die Temperatur eines schwarzen Körpers sein, damit das Intensitätsmaximum in der Mitte des sichtbaren Bereichs liegt? Warum können solche Temperaturen nicht mit einem herkömmlichen Glühdraht erreicht werden?

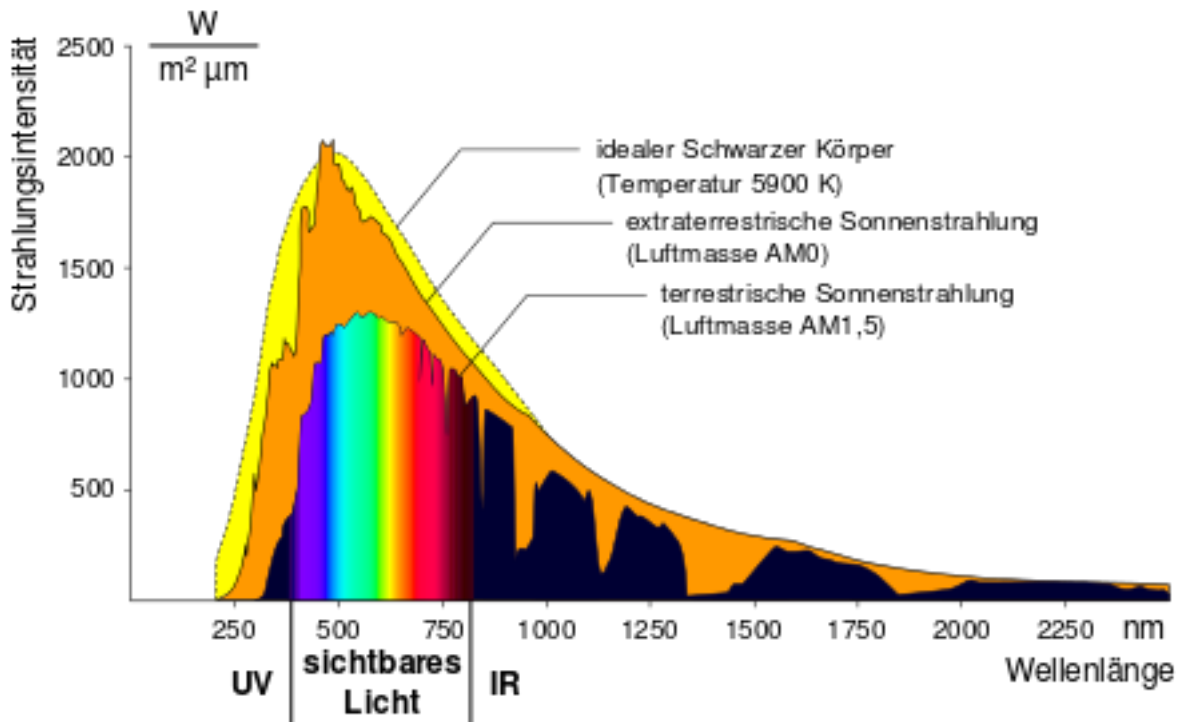


Abbildung 1.1: Intensitätsspektrum eines sonnenähnlichen Schwarzkörpers

Nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz ergibt sich mit $\lambda_{\text{avg}} = 550 \text{ nm}$:

$$T_{\text{avg}} = 5268 \text{ K}$$

Solche Temperaturen können mit herkömmlichen Glühlampen aus Wolfram nicht erreicht werden, da Wolfram einen Schmelzpunkt von $T_{\text{schmelz}} = 3695 \text{ K}$ aufweist.

7. Wie kann die Temperatur eines Glühlampes relativ einfach (in guter Näherung) bestimmt werden, wenn der Verlauf des Spektrums der Strahlung bekannt ist? Wie kann diese bestimmt werden, wenn nur ein kleiner Ausschnitt des Verlaufs (z.B. nur der sichtbare Bereich) bekannt ist?

Ist das gesamte Spektrum bekannt, so kann durch Ermittlung der Wellenlänge, bei der das Intensitätsmaximum auftritt, die Temperatur des Strahlers über das Wien'sche Verschiebungsgesetz recht einfach berechnen. Ist nur ein Teil des Spektrums bekannt, so kann aus dem Auftreten bestimmter Spektrallinien zumindest eine Mindesttemperatur extrapoliert werden, die nötig ist, um das Material des Glühlampes mit der entsprechenden Wellenlänge zum Leuchten zu bringen.

8. Erklären Sie den Begriff der Farbtemperatur. Was sagt dieser Begriff über das Spektrum einer Glühlampe (Temperaturstrahler) und einer Energiesparlampe (Gasentladungslampe) aus?

1 Optische Spektroskopie

Unter Farbtemperatur versteht man die zu einer bestimmten Farbe gehörende Temperatur, die nötig ist, um einen schwarzen Körper unter festgelegter Helligkeit und Beobachtungsbedingungen möglichst genau mit dieser Farbe zum Strahlen zu bringen.

Die Farbtemperatur von Energiesparlampen und anderen Gasentladungslampen ist im Normalfall bei ca. 4000 K – 5000 K und damit höher, als bei Glühlampen (ca. 2600 K – 3000 K). Eine Ausnahme bilden hier lediglich Natriumdampflampen, deren Farbtemperatur etwa 2000 K beträgt. Damit ist im Allgemeinen eine höhere Temperatur nötig, um mit einem schwarzen Körper das Leuchten einer Energiesparlampe nachzuahmen, als das einer Glühbirne.

9. Welcher proportionale Zusammenhang besteht zwischen spezifischer Ausstrahlung und Temperatur eines schwarzen Körpers? Welches Gesetz beschreibt diesen Zusammenhang?

Wie oben bereits beschrieben, hängen die spezifische Ausstrahlung und Temperatur eines schwarzen Körpers über das Wien'sche Gesetz (1.2) zusammen.

10. Wie kann mit Hilfe eines Spektrometers auf die chemischen Inhaltsstoffe von Gasentladungslampen geschlossen werden?

Die Spektren von Gasentladungslampen haben meist sehr ausgeprägte Maxima, man spricht auch von Linienspektren. Vergleicht man die Wellenlängen dieser Peaks mit den Emissionsspektren von bekannten Stoffen, so lässt sich auf die chemische Zusammensetzung des jeweiligen Leuchtstoffs schließen.

1.2 Durchführung

1.2.1 Allgemeine Hinweise

Zum Wechseln der Lampen (230 Volt!)

- Lampe vor Wechseln ausschalten und abkühlen lassen
- Nicht die Kontakte in der Fassung berühren

Zum Umgang mit dem Lichtwellenleiter

- Zu starke Krümmung vermeiden ($r \geq 15$ cm)
- Unnötige Verspannungen des Knickschutzes vermeiden
- Berührungen mit dem Lichtwellenleitereingang vermeiden, diesen nach Versuchsende verschließen
- Abstand zwischen Lampe und Leiter min. 15 cm

Zur Versuchsdurchführung

- Auf möglichst wenig Umgebungslicht achten
- Dunkel- und Referenzspektrum aktuell halten
- Richtige Parameter beim Speichern angeben
- Diagramme mit allen relevanten Angaben beschriften

1.2.2 Einführende Versuche

Einführung in SpectraWiz

Öffnen Sie SpectraWiz und wechseln Sie ggf. in den Scope-Modus. Setze die Parameter folgendermaßen:

SCOPE -> ... TIME: 100 MS, AVG:1, SM:0, SG:0, TC:OFF, XT:3, CH:1

Richten Sie den Lichtwellenleiter auf die Glühlampe aus und fixieren Sie ihn mithilfe des Stativmaterials. Speichern Sie bei abgeschalteter Lampe das Dunkelspektrum.

- Wozu wird das Dunkelspektrum benötigt?

Justieren Sie den Lichtwellenleiter so, dass das Maximum des Graphen im obersten Viertel der Skala liegt.

- Wie wirkt sich eine Änderung der Parameter "DETECTOR INTEGRATION TIME" und "NUMBER OF SCANS TO AVERAGE" auf die Anzeige aus?

Nehmen Sie das Spektrum der Glühlampe auf und speichern Sie es ab.

- Begründen Sie, warum die angezeigte Intensitätsverteilung nicht der tatsächlichen Verteilung des Glühlampenspektrums entsprechen kann.

Aufnahme von Transmissionsspektren

Nehmen Sie das Glühlampenspektrum als Referenzspektrum auf und wechseln Sie in den Transmissionsmodus

- Wozu wird das Referenzspektrum benötigt?
- Woran lässt sich im Transmissionsmodus erkennen, ob das Referenzspektrum und das Dunkelspektrum richtig eingestellt, bzw. ob die beiden noch aktuell sind?
- Warum ist im Wellenlängenbereich unterhalb von ca. 350 nm keine sinnvolle Transmissionsmessung möglich?

Halten Sie farbige Brillengläser in den Strahlengang.

- Beschreiben Sie qualitativ Ihre Beobachtungen bzgl. der Farbe und des dazugehörigen Transmissionsspektrums.

1 Optische Spektroskopie

Nehmen Sie die Transmissionsspektren zweier einzelner Gläser und das Spektrum der Kombination auf und speichern Sie sie ab. Stellen Sie die Spektren in QtiPlot in einem Diagramm dar und drucken Sie dieses aus.

- Welcher mathematische Zusammenhang gilt für die einzelnen eben erwähnten Transmissionsgrade?

(#) Ermitteln Sie in QtiPlot rechnerisch das Transmissionsspektrum der Filterkombination. Stellen Sie dieses zusammen mit den anderen Spektren in einem Diagramm dar.

Aufnahme von Emissionsspektren

Nehmen Sie im Scope-Modus das Spektrum einer Energiesparlampe auf und speichern Sie dieses ab.

- Beschreiben Sie qualitativ die Unterschiede zum Spektrum einer Glühlampe.

Nehmen Sie die Spektren der LEDs (rot, grün, blau) auf.

- Notieren Sie sich zu den einzelnen Farben der LEDs die Wellenlängenwerte der Maxima, welche Sie in SpectraWiz bestimmen können.
- Lässt sich durch diese Werte auf den jeweiligen Farbeindruck schließen? Begründen Sie Ihre Aussage.

Bestimmung der Farbtemperatur einer Glühlampe

Öffnen Sie in QtiPlot die Umrechnungstabelle und importieren Sie das Glühlampenspektrum. Führen Sie die für die Umrechnung erforderlichen Schritte aus und stellen Sie das angepasste Spektrum dar.

- Warum müssen zur Bestimmung der Farbtemperatur die Messdaten umgerechnet werden?
- Begründen Sie qualitativ, wie und wie stark sich die angelegte Wechselspannung ($f = 50 \text{ Hz}$) im Vergleich zu einer entsprechenden Gleichspannung auf die Farbtemperatur auswirkt.

Erstellen Sie mittels des Fit-Assistenten eine geeignete Kurve für den Wellenlängenbereich von ca. 1-2000nm. Drucken Sie das Diagramm, in dem die ermittelte Temperatur ersichtlich ist, aus.

- Beschreiben Sie mit Hilfe des Graphen, warum eine Glühlampe als Beleuchtungsmedium nicht effizient ist.
- Bestimmen Sie mit Hilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes die Lage des Maximums des angezeigten Schwarzkörperspektrums.

1.2.3 Erzeugung verschiedener Farbtemperaturen mit einem Glühlämpchen

Nehmen Sie drei verschiedene Spektren durch Änderung der Spannung (max. 10 Volt!) zu den subjektiv empfundenen Intensitäten "Schwach", "mittel" und "Stark" ab.

Ermitteln Sie in QtiPlot die Farbtemperaturen und speichern Sie die Diagramme ab.

- Begründen Sie qualitativ, wie und warum sich die angelegte elektrische Spannung auf das aufgenommene Spektrum auswirkt.

1.2.4 Auswertung des Sonnenspektrums

Aufnahme des Sonnenspektrums

Richten Sie den Lichtwellenleiter so aus, dass Sie das Sonnenspektrum aufnehmen können (Aufnahme des Streulichts genügt). Speichern Sie bei aktuell gehaltenem Dunkelspektrum die Intensitätsverteilung ab.

Bestimmung der Oberflächentemperatur der Sonne

Rechnen Sie die Messdaten in QtiPlot um und stellen Sie sie graphisch dar. Erstellen Sie eine Fit-Kurve* und drucken Sie das Diagramm mit Angabe der ermittelten Oberflächentemperatur aus.

*Für den Fall, dass keine geeignete Kurve ermittelt werden kann, stellen Sie den Verlauf eines Schwarzkörperspektrums für $T = 6000 \text{ K}$ dar.

- Begründen Sie kurz einige bei dieser Auswertung vorliegende Fehlerquellen.

Bestimmung der wichtigsten Fraunhofer'schen Linien

Stellen Sie das Sonnenspektrum in einem neuen Diagramm dar. Drucken Sie den Graphen aus. Bestimmen Sie mit Hilfe des "Datenlesers" die Wellenlängen der Einbrüche im Spektrum, welche den jeweiligen Fraunhofer'schen Linien entsprechen (vgl. Tabelle).

- Kennzeichnen Sie die Lage dieser Linien im Diagramm.
- Notieren Sie die gemessenen Wellenlängenwerte und bestimmen Sie die Differenz zu den Tabellenwerten.
- Wie lässt sich diese Differenz erklären?

1.2.5 Bestimmung chemischer Elemente

Stellen Sie das Spektrum einer Glühlampe im Scope-Modus dar. Dieses erhalten Sie durch Aufnahme der Schalterbeleuchtung einer Steckdosenleiste. Justieren Sie hierzu den Lichtwellenleiter senkrecht über dem Schalter in wenigen Zentimetern Abstand.

- Erläutern Sie qualitativ, ob und wie der transparente gefärbte Kunststoff des Schalters die Aufnahme des Spektrums beeinflusst.

Tabelle 1.1: Wichtige Fraunhofer'sche Linien

| Symbol | λ [nm] | Element |
|----------------------|----------------|---------|
| A | 760.8 | O |
| B | 686.7 | O |
| C | 656.3 | H |
| D₁ | 589.6 | Na |
| D₂ | 589.0 | Na |
| E | 527.0 | Fe |
| F | 486.1 | H |
| G | 430.8 | Fe |
| H | 396.8 | Ca |
| K | 393.4 | Ca |

- Warum ist für diesen Versuchsteil keine Umrechnung der Daten in QtiPlot notwendig?

Werten Sie das abzuspeichernde Spektrum in QtiPlot aus. Bestimmen Sie mittels ausliegender Messdaten bekannter Stoffe das für die Strahlung verantwortliche Element in der Lampe.

Importieren Sie zusätzlich die Messdaten des passenden Vergleichsspektrums und stellen Sie dieses im gleichen Diagramm dar.

- Welchen Vorteil hat dieses Verfahren gegenüber der Auswertung mit Hilfe von Tabellenwerten?

Beschriften Sie markante Peaks mit zugehörigen Wellenlängen und drucken Sie das Diagramm aus.

(#)Belegen Sie graphisch, dass in einer Energiesparlampe Anteile von Quecksilber vorhanden sind. Drucken Sie anschließend Ihre Ergebnisse mit geeigneter Beschriftung aus.

1.2.6 Additive Farbmischung

Betrachten Sie im Scope-Modus das Spektrum der farbwechselnden LED-Lampe und beantworten Sie folgende Fragen:

- Wie viele verschiedenfarbige LEDs werden in dieser Lampe eingesetzt?
- Welche (Peak-)Wellenlängen und Farben haben diese LEDs?

- Nennen Sie zusätzlich ein Beispiel, an dem ersichtlich wird, warum aufgrund eines Farbeindrucks nicht auf die zugrundeliegenden Wellenlängen geschlossen werden kann.

Veranschaulichen Sie sich die additive Farbmischung mittels LEDs, deren Helligkeit einzeln verändert werden kann. Versuchen Sie, Mischfarben zu erzeugen. Verwenden Sie die Lampe als Streumedium. Richten Sie die LEDs auf eine weiße Fläche und erzeugen Sie Schatten in verschiedenen Farben.

- Erklären Sie das Zustandekommen dieser bunten Schatten.

2 Lichtbeugung an Spalt und Gitter

In diesem Versuch soll das auch in der Spektroskopie Anwendung findende Prinzip der Beugung elektromagnetischer Wellen an einem oder mehreren Spalten genauer untersucht werden. Hierzu wird mit monochromatischem Licht gearbeitet, sodass aus der Theorie bekannte Beugungsgesetze, die in der Regel von der Wellenlänge des benutzten Lichts abhängen, möglichst gut überprüft werden können. Hier sollen zunächst die Zusammenhänge für den Einzelspalt angegeben werden:

$$\begin{aligned}\sin(\phi_{k,min}) &= \frac{\lambda}{b} \cdot k \\ \sin(\phi_{k,max}) &= \frac{\lambda}{b} \cdot \left(k + \frac{1}{2}\right) \\ \phi_{0,max} &= 0\end{aligned}$$

Hierbei ist λ die Wellenlänge, b die Spaltbreite und $k \in \mathbb{N}$ die Beugungsordnung.

Fügt man einen zweiten Spalt (mit gleicher Spaltbreite) im Abstand d hinzu, so erhält man zusätzlich zu den Beugungsextrema Interferenzeffekte, die ebenfalls zu Extrema führen, die sich folgendermaßen berechnen:

$$\begin{aligned}\sin(\Psi_{m,min}) &= \frac{\lambda}{d} \left(m + \frac{1}{2}\right) \\ \sin(\Psi_{m,max}) &= \frac{\lambda}{d} \cdot m\end{aligned}$$

Hierbei ist $m \in \mathbb{N}_0$

Erweitert man diesen Aufbau erneut zu einem Gitter mit N gleich breiten Spalten im gleichen Abstand, so ergibt sich eine etwas unhandlichere Beziehung für die Intensität des Lichtes in Richtung ϕ :

$$I(\phi) = \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \phi\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \phi} \right)^2 \left(\frac{\sin\left(\frac{N\pi b}{\lambda} \sin \phi\right)}{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \phi\right)} \right)^2$$

2.1 Vorbereitung

1. Nehmen Sie an, die Beugung findet nicht in Luft ($n \approx 1$), sondern in Wasser statt ($n > 1$). Wie ändert sich das Beugungsbild?

Da Wasser ein optisch dichteres Medium ist, als Luft, wird die Wellenlänge verringert:

$$\lambda' = \frac{c'}{\nu} = \frac{c}{\nu} \cdot \frac{1}{n} = \frac{\lambda_0}{n}$$

2 Lichtbeugung an Spalt und Gitter

Dies bedeutet, da $\phi \in [0, \frac{\pi}{2}]$, dass die Winkel, unter denen die Extrema auftreten, kleiner werden.

2. Es werde zuerst das Beugungsbild eines Doppelspalttes fotografisch aufgenommen; auf einem gleichartigen Film werden dann nacheinander die Beugungsfiguren beider Einzelspalte auf demselben Film aufgenommen. Insgesamt werden beide Filme gleich lange belichtet. Vergleichen Sie die Beugungsbilder miteinander. Erklären Sie Gleichheit oder Ungleichheit.

Die Beugungsbilder unterscheiden sich, da die physikalischen Vorgänge nicht vollkommen gleich sind. Werden die Bilder der Einzelspalte aufgenommen, so addieren sich schlichtweg die Intensitäten:

$$I = I_1 + I_2$$

Beim Doppelspalt werden hingegen die Felder addiert, nicht die Intensität. Diese ist proportional zum Feldquadrat:

$$I \propto \vec{E}^2 = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^2 = \underbrace{\vec{E}_1^2}_{\propto I_1} + \underbrace{\vec{E}_2^2}_{\propto I_2} + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$$

Die Gesamtintensität ist beim Doppelspalt daher nicht identisch mit der zweier Einzelspalten.

3. Nehmen Sie an, bei einem Doppelspalt werden die beiden Spalte jeweils von verschiedenen Lasern beleuchtet. Wie würde sich das Beugungsbild gegenüber dem üblichen Experiment ändern?

Wenn die Laser die gleiche Wellenlänge abstrahlen, ergibt sich das (bis auf durch eventuelle Phasenunterschiede hervorgerufene Schwebungen) gleiche Beugungsbild, wie bei der normalen Beugung des Lichtes einer Lichtquelle an einem Doppelspalt. Weisen die Laser unterschiedlicher Wellenlängen auf, so wirkt jeder Spalt als Einzelspalt für die jeweilige Lichtquelle.

4. Nehmen Sie an, ein Laserstrahl wird durch Spiegel aufgespalten und die beiden Strahlen beleuchten je einen Spalt. Besteht ein Unterschied zu dem vorher geschilderten Fall? Wenn ja, erklären Sie, weshalb.

Wird der Laser aufgespalten, so können Phasenunterschiede zwischen den Teilstrahlen entstehen, was wie im obigen Fall zu Schwebungen führen kann. Ansonsten ergibt sich das gleiche Bild.

5. Wie ändert sich das Beugungsbild eines Spaltes, wenn dieser statt mit einem Laser mit Licht einer Hg-Dampflampe beleuchtet wird?

Das Licht einer Quecksilberlampe ist nicht monochromatisch, sondern weißt im sichtbaren Bereich gleich 6 unterschiedliche Emissionslinien auf, die daher auch unterschiedlich gebeugt werden. Daher kann man im Beugungsbild Extrema unterschiedlicher Wellenlängen an unterschiedlichen Orten beobachten.

6. Was unterscheidet Fraunhofer- und Fresnel-Beugung?

Die Fraunhofer-Näherung der Lichtbeugung ist eine Fernfeldnäherung, die Fresnel-Näherung hingegen eine Nahfeldnäherung. Dies hat zur Folge, dass beispielsweise das Beugungsintegral unter der Fraunhofer'schen Betrachtung recht einfach zu lösen ist, da es lediglich die Form einer Fourier-Transformierten hat. In Fresnel-Näherung hingegen ist dies nicht der Fall, und das Beugungsintegral ist im Allgemeinen nur numerisch zu lösen.

7. Leiten Sie für den Einfachspalt die Formel $I(\phi) = I_0 \left(\frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} \right)^2$ mit $\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \sin \phi$ und $I_0 = I(\phi = 0)$ für die Intensitätsverteilung in Abhängigkeit vom Beugungswinkel ϕ ab.

Berechnen Sie das Intensitätsverhältnis $I(\phi_{k,max})/I(\phi = 0)$ für die erste ($k = 1$) und zweite ($k = 2$) Beugungsordnung.

Das elektrische Feld am Schirm erhält man zunächst durch Fouriertransformation:

$$\begin{aligned} E(k_x, k_y) &= E_0 \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy \Sigma_{Spalt} e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} = E_0 \delta(k_y) \cdot \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{-ik_x x} dx \\ &= E_0 \delta(k_y) \frac{e^{-ik_x \frac{b}{2}} - e^{ik_x \frac{b}{2}}}{k_x} = E_0 \cdot b \cdot \delta(k_y) \frac{\sin(k_x \frac{b}{2})}{k_x \frac{b}{2}} \\ &\Rightarrow I(k_x) = E(k_x)^2 = I_0 \frac{\sin^2(k_x \frac{b}{2})}{(k_x \frac{b}{2})^2} \end{aligned}$$

Mit $k_x = \sin \phi \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$ und $\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \sin \phi$ folgt:

$$I(\phi) = I_0 \frac{\sin^2(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \phi)}{(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \phi)^2} = I_0 \frac{\sin^2(\frac{\theta}{2})}{(\frac{\theta}{2})^2}$$

Für die k -te Beugungsordnung gilt:

$$\sin(\phi_{k,max}) = \frac{\lambda}{b} \left(k + \frac{1}{2} \right)$$

Für die zu berechnenden Intensitätsverhältnisse erhält man somit:

$$\begin{aligned} \frac{I(\phi_{k,max})}{I_0} &= \frac{I_0 \frac{\sin^2(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \phi)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \phi}}{I_0} = \frac{\sin^2(\frac{\pi b}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{b} (k + \frac{1}{2}))}{(\frac{\pi b}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{b} (k + \frac{1}{2}))^2} = \frac{\sin^2(\pi (k + \frac{1}{2}))}{(\pi (k + \frac{1}{2}))^2} \\ \frac{I(\phi_{1,max})}{I_0} &= \frac{\sin^2(\pi (1 + \frac{1}{2}))}{(\pi (1 + \frac{1}{2}))^2} = \frac{4}{9\pi^2} \approx 0.045 \\ \frac{I(\phi_{2,max})}{I_0} &= \frac{\sin^2(\pi (2 + \frac{1}{2}))}{(\pi (2 + \frac{1}{2}))^2} = \frac{4}{25\pi^2} \approx 0.016 \end{aligned}$$

2 Lichtbeugung an Spalt und Gitter

8. Verifizieren Sie für den Doppelspalt den Ausdruck $I(\phi) = 4 \cdot I_0 \cdot \left(\frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}}\right)^2 \cdot \cos^2 \frac{\delta}{2}$ mit $\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \sin \phi$ und $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sin \phi$ und I_0 aus Frage 7. Begründen Sie anschaulich das Auftreten des Faktors 4 und berechnen Sie die Intensität des ersten Nebenmaximums $m = 1$ relativ zum nullten in Abhängigkeit von Spaltbreite b und Spaltabstand d . Für welches Verhältnis d/b fällt das fünfte Nebenmaximum mit dem ersten Haupt-Minimum zusammen?

Wie bereits oben beschrieben, werden beim Doppelspalt die Felder der hier um $\pm \frac{d}{2}$ verschobenen Einzelspalte überlagert. Bei der Fouriertransformation taucht nun ein zusätzlicher Phasenterm auf:

$$E_{Spalt,\nu} = E_{Spalt} \cdot e^{-ik_x x \frac{d}{2}}$$

Für den Doppelspalt ergibt sich somit:

$$E_{DS} = E_{Spalt} \left(e^{-ik_x x \frac{d}{2}} + e^{ik_x x \frac{d}{2}} \right) = 2 \cdot E_0 \frac{\sin(\frac{\theta}{2})}{\frac{\theta}{2}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \sin \phi\right)$$

Mit dem angegebenen δ berechnet sich die Intensität durch Quadrieren der Feldstärke zu

$$I_{DS} = 4 \cdot I_0 \cdot \left(\frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}}\right)^2 \cdot \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

Der Faktor 4 taucht also auf, weil zunächst zwei Felder gleiche Amplitude addiert werden, und das resultierende Feld $2E_0$ anschließend quadriert wird.

Für das Nebenmaximum m -ter Ordnung gilt:

$$\sin \Psi = \frac{\lambda}{d} \cdot m$$

Damit erhält man für das Verhältnis der Intensitäten des ersten zum nullten Nebenmaximum analog zu Aufgabe 7:

$$\frac{I(\Psi_{1,max})}{I_0} = \left(\frac{\sin(\frac{\pi b}{d})}{\frac{\pi b}{d}}\right)^2$$

Damit das 5. Nebenmaximum mit dem ersten Hauptminimum zusammenfällt, muss gelten:

$$\frac{\lambda}{d} \cdot 5 = \frac{\lambda}{b} \Rightarrow \frac{d}{b} = 5$$

2.2 Durchführung

2.2.1 Beugungsbild des Einfachspaltes

- a) Nehmen Sie die Intensitätskurve der Beugungsfigur eines Einfachspaltes auf.

- b) Berechnen Sie aus Ihren Messdaten die Spaltbreite. Finden Sie eine andere optische Messmethode zur Bestimmung der Spaltbreite und vergleichen Sie beide Ergebnisse miteinander.
- c) Werten Sie auch die Intensitätsverhältnisse aus und vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Beugungstheorie.

2.2.2 Beugungsbild des Doppelspaltes

- a) Wiederholen Sie die obige Messung für einen Doppelspalt. Was fällt am Beugungsbild, was an der Intensitätskurve des Beugungsbildes auf?
- b) Erklären Sie die Intensitätskurven mit der Beugungstheorie.
- c) Kontrollieren Sie das Verhältnis der Intensitäten von 0. und 1. Maximum 2. Klasse. Vergleichen Sie mit der Theorie. Überlegen Sie alle Fehlermöglichkeiten, um Abweichungen von Experiment und Theorie zu erklären.

2.2.3 Beugungsbild eines optischen Gitters

- a) Nehmen Sie die Intensitätskurve der Beugungsfigur eines optischen Gitters auf.
- b) Vergleichen Sie die Kurve für den N-fachen Spalt mit der Kurve des Doppelspalts.
- c) Berechnen Sie aus den Messdaten den mittleren Spaltabstand (Gitterkonstante)
- d) Versuchen Sie, den Einfluss des Einzelspaltes auf das Beugungsbild zu sehen.

3 Optische Geräte

Bei diesem Versuch soll selbständig mit einfachen, aber grundsätzlich wichtigen optischen Geräten experimentiert werden. Im Vordergrund steht hier also das eigene Beobachten. Die quantitative Auswertung beruht auf den Gesetzen der geometrischen Optik. Konkret lässt sich dies an folgenden Aufgaben festmachen:

- Theoretische Überlegungen und Berechnungen experimentell überprüfen
- Grundgesetze der geometrischen Optik durch Anwenden besser verstehen
- Probleme der geometrischen Optik praktisch lösen
- Versuchsaufbauten justieren und optimieren
- Wichtige optische Geräte und Instrumente (Lupe, Fernrohre, Projektionsapparat, Mikroskop) in offener Versuchsanordnung nachbauen

Es wird mit folgenden Geräten experimentiert:

- Lupe: Konvexlinse, die ein vergrößertes virtuelles Bild des Gegenstandes erzeugt, der sich innerhalb der Brennweite befindet
- Astronomisches Fernrohr: (auch Keplersches Fernrohr genannt) besteht aus zwei Sammellinsen
- Terrestrisches Fernrohr: besteht aus drei Linsen, wobei die Zwischenlinse der Bildumkehr dient
- Das holländische Fernrohr (Galileisches Fernrohr): aufgebaut aus Sammel- und Zerstreuungslinse
- Diaprojektor: aufgebaut aus Lampe, Kondensator, Objektiv und Schirm
- Erzeugung eines vergrößerten, auf dem Kopf stehenden, seitengedrehten Bild
- zwei Strahlengänge: beleuchtend und abbildend
- Mikroskop: Entwerfung eines reellen Zwischenbildes in vergrößertem Maßstab, welches mit einer Lupe beobachtet wird

3.1 Fragen zur Vorbereitung

1. Wie lautet die Abbildungsgleichung für dünne Sammell- und Zerstreuungslinsen? Welche Näherungen werden bei der Herleitung gemacht? Was ist die Hauptebene einer Linse?

Abbildungsgleichung für dünne Linsen: $\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1 - r_2} \right)$ falls $d \ll r_1, r_2$

g= Gegenstandsweite

b= Bildweite

f= Brennweite

Hauptebene: zwei in einem Abbildungssystem definierte Ebenen, in denen vereinfacht die Brechungen der Lichtstrahlen angenommen werden im Raum zwischen den Hauptebenen werden die Lichtstrahlen parallel zur optischen Achse verlaufend gedacht

2. Wodurch werden die Bildhelligkeit und das Gesichtsfeld beeinflusst bzw. begrenzt?

Gesichtsfeld = alle zentralen peripheren Gegenstände und Punkte des Außenraums, die bei ruhiger, gerader Kopfhaltung und geradeaus gerichteten, bewegungslosem Blick wahrgenommen werden können, auch ohne sie direkt zu fixieren

Umfang des Gesichtsfeldes ist abhängig von der Pupillenweite und der Lage des Auges zu den Nachbarorganen (Nase, Augenlid). Bei tief in der Augenhöhle sitzenden Augen ist das Gesichtsfeld kleiner. An der Innenseite ist die größte Ausdehnung, an der Außenseite die kleinste. Die Farbenempfindlichkeit ist nicht an allen Stellen gleich - die äußerste Peripherie des Gesichtsfeldes ist die "farbenlose Zone", nach der Mitte zu folgt des Gesichtsfeld von blau, gelb, rot und grün.

Bildhelligkeit = Beleuchtungsstärke in der Bildebene eines abbildenden Systems oder Grauwert (digitales Bild) Bild wird heller, je größer der Linsendurchmesser ist, d.h. je mehr von der Strahlungsenergie eingefangen werden kann.

3. Leiten Sie die Formeln für die Vergrößerung von Lupe, den Fernrohren und dem Mikroskop her. Berücksichtigen Sie beim Fernrohr insbesondere die großen Gegenstandsweiten.

Allgemein gilt:

$$V = \frac{\text{Sehwinkel mit Instrument}}{\text{Sehwinkel ohne Instrument}} = \frac{\text{Sehwinkel mit Instrument}}{\text{Sehwinkel im Abstand } S_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$$V_{\text{Lupe}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{G}{f_l} * \frac{S_0}{G} = \frac{S_0}{f_l}$$

$$V_{\text{Mikroskop}} = V_{\text{Objektiv}} \cdot V_{\text{Okular}} = \frac{l \cdot S_0}{f_{\text{Obj}} \cdot f_{\text{Oku}}}$$

$$(l = \text{Tubulänge})$$

$$V_{\text{Fernrohr}} = V_{\text{Objektiv}} \cdot V_{\text{Okular}} = \frac{\frac{B}{S_0}}{\frac{G}{g}} = \frac{f_{\text{Objektiv}}}{f_{\text{Okular}}}$$

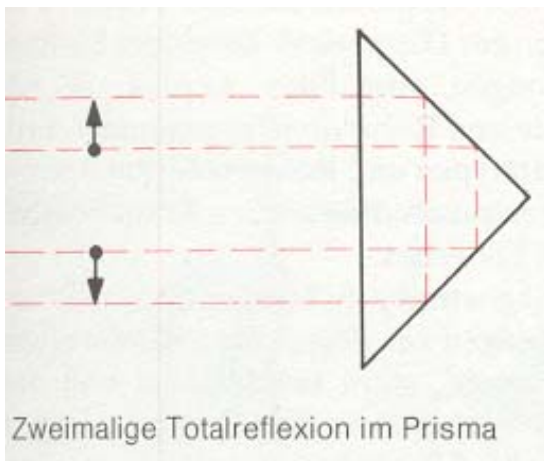
$$V_{\text{Holländisches Fernrohr}} = \frac{f_{\text{Objektiv}}}{|f_{\text{Okular}}|}$$

4. In welche Entfernungsbereiche - bezogen auf die Brennweite der Lupe - können der zu betrachtende Gegenstand und das Auge gebracht werden?

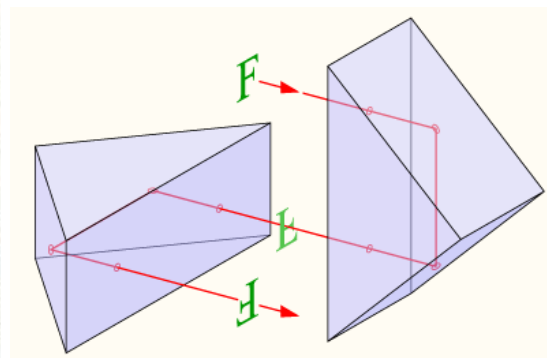
Bei einer Lupe beträgt der ideale Abstand zum Auge 25 cm, wenn der Gegenstand im Brennpunkt liegt. Liegt der Gegenstand zwischen Brennpunkt und Linse, ist das Auge angespannt, man muss das Auge auch näher an die Linse bringen. Falls sich der Gegenstand hinter der Brennweite befindet, kann er nicht mehr vergrößert gesehen werden.

5. Warum benutzt man in der Praxis meist Prismenfernrohre? Zeichnen Sie den Strahlengang!

Das Prismenfernrohr besteht wie das astronomische Fernrohr aus Obektiv und Okular.



(a) Strahlengang bei Umkehrprismen



(b) Bildumkehr

Das astronomische Fernrohr ergibt aber ein kopfstehendes Bild. Zur Umkehrung dieses

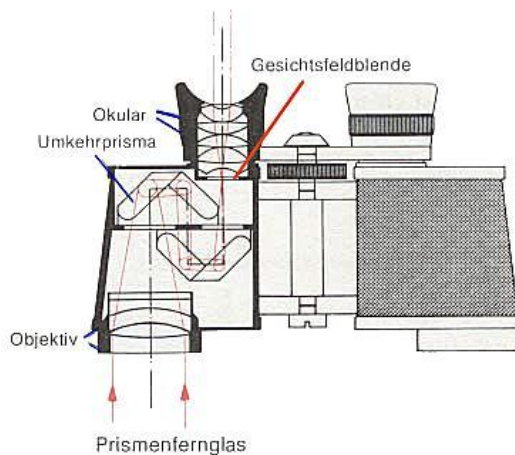
3 Optische Geräte

Bildes werden Prismen benutzt. Da bei dem kopfstehenden Bild auch links und rechts vertauscht werden, muss der Strahlengang noch ein zweites Prisma durchlaufen, damit auch die Seitenrichtigkeit wiederhergestellt ist. Diese Prismenanordnung bringt gegenüber dem terrestrischen Fernrohr durch den 3fach nebeneinanderglegten Strahlengang eine wesentlich verkürzte Baulänge. Der gegenüber dem Augenabstand vergrößerte Objekt- abstand ist für das räumliche Sehen von Vorteil.

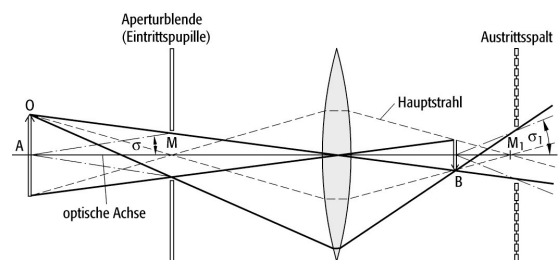
6. Erläutern Sie anhand einiger einfacher optischer Abbildungsanordnungen die Begriffe Apertur und Gesichtsfeldblende. Was will man mit ihnen bezwecken?

Gesichtsfeldblende: gibt der optischen Abbildung eine scharfe Begrenzung. Der abgebildete Bildausschnitt kann somit verändert werden, die Helligkeit des Bildes bleibt unbeeinflusst (im Gegensatz zur Aperturblende)

Aperturblende: begrenzt bei einem optischen System dessen Apertur (Öffnungsweite), bei Verkleinerung der Apertur werden Helligkeit und Auflösung geringer, die Schärfentiefe wird größer und der Bildausschnitt bleibt erhalten (beim Auge ist die Iris die Aperturblende)



(c) Gesichtsfeldblende und Umkehrprismen



(d) Aperturblende

7. Wie lassen sich in optischen Systemen mit einem vorgegebenen Linsensatz kurze Brennweiten erzielen?

$$\text{Es gilt: } \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

→ Kurze Brennweiten lassen sich durch einen möglichst kleinen Abstand d erzielen

8. Welche Linsenfehler gibt es? Nennen Sie Möglichkeiten zu ihrer Beseitigung!

sphärische Aberration: bewirkt Unschärfe des Bildes; Beseitigung durch Unterdrückung achsenferner Strahlen mithilfe einer Blende

Astigmatismus: Objekte, die außerhalb der optischen Achse liegen, werden unscharf abgebildet; Korrektur durch Kombination von sphärischen und torischen Gläsern. Die Hornhautverkrümmung kann auch operativ behandelt werden.

9. Erläutern Sie, warum Präzisionsfernrohre für die Astronomie nicht mit Linsen sondern mit Spiegeln gebaut werden.

Es werden Spiegel benutzt, da sie eine größere Fläche abbilden können und billiger sind. Außerdem kann es keinen Farbfehler geben.

10. Zeichnen und erläutern Sie die Optik im menschlichen Auge! Erörtern Sie Kurz- und Weitsichtigkeit sowie Astigmatismus.

Hornhaut: schützt das Auge nach außen

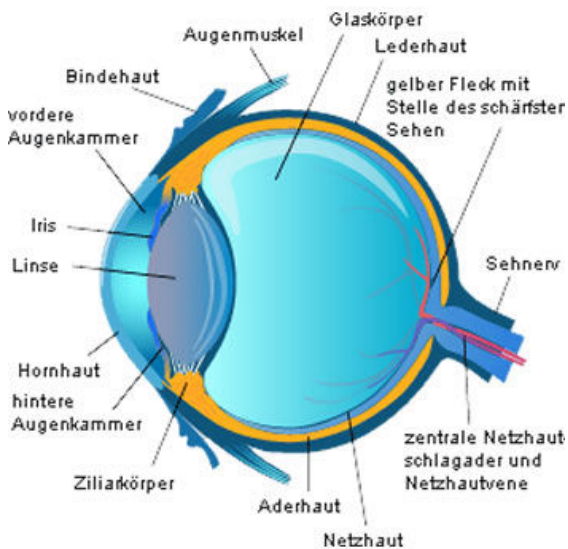


Abbildung 3.1: Anatomie des Auges

Iris und Pupille: Iris regelt Größe der Pupille und damit die Menge des durch die Linse durchtretenden Lichts

Linse: wesentliches Abbildungssystem des Auges

Glaskörper: Bestandteil des Abbildungssystems, sorgt für konst. Abstand Linse + Netzhaut

Netzhaut: beinhaltet Sehsinneszellen (Zäpfchen + Stäbchen)

Aderhaut: enthält Versorgungssystem für Netzhaut

Lederhaut: schützt das Auge nach außen Kurzsichtigkeit: zu langer Augapfel, der Fokus liegt vor der Netzhaut

Weitsichtigkeit: zu kurzer Augapfel, der Fokus liegt hinter der Netzhaut

Astigmatismus: siehe Aufgabe 8, Ursache: Hornhaut nicht exakt kreisförmig, sondern torisch, unterschiedliche Brechkraft an unterschiedlichen Stellen der Hornhaut, Strahlen bündeln sich nicht an einem Punkt

11. Warum besteht der Kondensor eines Diaprojektors aus zwei plankonvexen Linsen? (Hinweis: Berücksichtigen Sie die Reflexionsverluste!) Plankonvexe Linsen werden benutzt,

3 Optische Geräte

um die Dias besser auszuleuchten, ein möglichst großer Teil des Lichts der Projektionslampe soll in den abbildenden Strahlengang eingebracht werden, Verringerung der sphärischen Aberration und Totalreflexion

12. Wie kann man die Vergrößerung eines Fernrohrs ohne Kenntnis der Brennweiten messen?

Die Vergrößerung eines Fernrohres kann man mithilfe der Durchmesser ein- und ausfallenden Strahlenbündel bestimmen.

$$V = \frac{d_{Aus}}{d_{Ein}}$$

13. Schätzen Sie die Größenordnung der Objektivbrennweite für einen Heimdiaprojektor ab, wenn Sie Raumgröße, Dia- und Leinwandgröße in Betracht ziehen

Leinwandgröße: 5m, Diagröße 5cm, Abstand zwischen Linse und Dia: 10cm, Abstand zwischen Linse und Wand: 10m Für Lupe gilt: $V = \frac{B}{G} \approx \frac{5m}{5cm} = 100$

Für Brennweite gilt: $f = \left(\frac{1}{0.1m} + \frac{1}{10m}\right)^{-1} = 9.9cm$

3.2 Durchführung

3.2.1 Lupe

Betrachten Sie Gegenstände mit und ohne Lupe. Bestimmen Sie bei den verschiedenen Beobachtungsarten jeweils die subjektiv ermittelten Vergrößerungen an.

3.2.2 Astronomisches Fernrohr

Material: 2 Achromate $f = 500\text{ mm}$, 60 mm und $f = 40\text{ mm}$, 10 mm Bikonvexlinse $f = 500\text{ mm}$, 38 mm 2 Bikonvexlinsen $f = 40\text{ mm}$, $= 24\text{ mm}$ 2 Iris-Blenden, Ständer mit Schiene und Reiter

1. Bauen Sie ein astronomisches Fernrohr von mehr als 10-facher Vergrößerung aus zwei Bikonvexlinsen.
2. Benutzen Sie eine Gesichtsfeldblende. Wo muss sie stehen, damit eine Gesichtsfeldbegrenzung bei Betrachtung sehr weit entfernter Gegenstände entsteht?
3. Benutzen Sie als Objektivlinse eine achromatische Linse. Beschreiben Sie die Unterschiede in der Bildgüte und bestimmen Sie die Vergrößerung experimentell.
4. Stellen Sie eine Blende vor die Objektivlinse und betrachten Sie das Bild mit verschiedenen Durchmessern der Blende vor dem Objektiv
5. Benutzen Sie als Okularlinse einen Achromaten

3.2.3 Terrestrisches Fernrohr

Bauen Sie ein terrestrisches Fernrohr gem. Abb. og.3 auf. Diskutieren Sie insbesondere die Rolle der mittleren Linse und ihren Einfluss auf die Vergrößerung. Untersuchen Sie die Einflüsse von Linsenqualität (Achromate) und Blenden wie beim Astronomischen Fernrohr

3.2.4 Holländisches Fernrohr

Material: Achromat $f = 500$ mm, Bikonkavlinse $f = -100$ mm Bikonkavlinse $f = -200$ mm, Blende, Ständer mit Schiene und Reitern

1. Welchen Einfluss hat der Objektivdurchmesser auf den Gesichtsfelddurchmesser?
2. Bestimmen Sie den Durchmesser des Gesichtsfeldes bei 5-facher Vergrößerung und bei 2,5 facher Vergrößerung (in beiden Fällen gleicher Objektivdurchmesser von 32 mm). Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Durchmesser des Gesichtsfeldes und der Vergrößerung?
3. Bestimmen Sie in beiden Fällen die Vergrößerung experimentell.

3.2.5 Spiegelteleskop

Beobachten Sie weit entfernte Gegenstände mit dem Spiegelteleskop. Beurteilen Sie Vor- und Nachteile gegenüber den vorher gebauten Fernrohren.

3.2.6 Diaprojektor

Vorhandene Komponenten: Bikonvexlinse $f = 80$ mm Optische Bank Achromat $f = 80$ mm Lampe Kondensor $f = 130$ mm Diahalter mit Diapositiv Iris-Blende Schirm Erzeugen Sie ein vergrößertes Bild des Diapositivs auf dem Schirm.

1. Beginnen Sie ohne Kondensorlinse mit einer Bikonvexlinse als Objektiv. Bilden Sie zunächst möglichst scharf ab bei einer Bildgröße von ca. 10 cm. Verschieben Sie jetzt den Schirm so, dass das Bild etwas unscharf wird und verkleinern Sie dann mit der Irisblende den Linsendurchmesser. Beschreiben Sie die beobachteten Effekte.
2. Benutzen Sie nun bei voller Objektivöffnung den Kondensor zur Beleuchtung des Diapositivs und beschreiben Sie die Veränderungen im Bild gegenüber Aufgabe 1.
3. Ändern Sie wieder wie in Aufgabe 1 den Objektivdurchmesser. Beschreiben Sie die beobachteten Effekte.
4. Benutzen Sie nun als Objektiv eine korrigierte Linse (Achromat) mit gleicher Brennweite unter Konstanthalten der Abstände. Diskutieren Sie die Bildfehler (Farbfehler, Verzerrungen, fehlende Schärfentiefe).

3.2.7 Mikroskop

Geräte: Lampe (mit Kondensor), Dia mit Strichgitter $d = 0,1$ mm halbdurchlässiger Spiegel mit Halterung, Beobachtungsschirm Okular $f = 25$ mm ($V = 10$), Objektiv $f = 40$ mm, 10 mm Berechnen Sie die optischen Parameter eines Mikroskops für die Vergrößerung $V = 50$. Bestimmen Sie die Vergrößerung experimentell mit Hilfe der modifizierten Mikroskopanordnung in Abb.10: Nach der Okularlinse wird eine Sammellinse L ($f_L = 100$ mm) platziert. Ein Beobachtungsschirm S wird im Abstand der Brennweite f_L aufgestellt. Durch die Wirkung dieser Sammellinse werden die parallelen Lichtbündel, die die Okularlinse unter dem Winkel ψ verlassen auf einen Punkt am Beobachtungsschirm fokussiert. Die Vergrößerung V des Mikroskopes kann bestimmt werden aus dem Verhältnis des Winkels ψ und dem Winkel, unter dem der Gegenstand G dem unbewaffneten Auge im Abstand der deutlichen Sehweite, s erscheint:

$$V = \frac{\psi}{\arctan(s)}$$

Als Objekt benutzen Sie am besten das Strichgitter. Um den Winkelabstand zweier Gitterlinien auf dem Schirm zu messen, bestimmen Sie die Höhe b , die von mehreren Gitterstrichen auf dem Beobachtungsschirm eingenommen wird, und dividieren sie durch die Zahl der Zwischenräume zwischen den betrachteten Gitterstrichen.

4 Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums

In diesem Versuch soll das Planck'sche Wirkungsquantum h bestimmt werden. Diese Größe ist neben der Lichtgeschwindigkeit c und der Gravitationskonstanten G die dritte fundamentale Naturkonstante der Physik. Sie beschreibt für schwingfähige Systeme das konstante Verhältnis aus der kleinstmöglichen Energieänderung und der Schwingungsfrequenz. Daraus folgt insbesondere, dass solche Systeme nur ganzzahlige Vielfache des sog. Schwingungsquants $\Delta E = h\nu$ aufnehmen können. Auch der Drehimpuls eines Systems kann sich nur um ganzzahlige Vielfache von $\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$ ändern. Dies sind jedoch nur einige der wichtigen Zusammenhänge, in denen die Planckkonstante eine wichtige Rolle spielt.

Die Bestimmung dieser fundamentalen Konstanten soll in diesem Versuch durch Messungen an Leuchtdioden, insbesondere der Feststellung von deren Wellenlängen über die Gleichung

$$E = h\nu \quad (4.1)$$

bestimmt werden. Zwischen der Wellenlänge λ und der Frequenz ν besteht dabei der bekannte Zusammenhang: $c = \lambda\nu$. Hierbei bezeichne c die Lichtgeschwindigkeit.

Da solche LEDs Halbleiter sind, muss in diesem Versuch auch eine gewisse Vertrautheit mit Grundlagen der Halbleiterphysik gegeben sein. Für diesen Versuch ist insbesondere das Resultat wichtig, dass die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts nur von der sogenannten Gap-Energie E_{gap} abhängt, also von der Energie, die frei wird, wenn ein Elektron vom Leitungsband, der Energiezone, in der sich frei bewegliche und damit leitungsfähige Ladungsträger befinden, in das energetisch tieferliegende Valenzband übergeht. Diese Energie ist eine Materialkonstante, womit klar wird, dass die Farbe der LED nur von den verwendeten Halbleitern abhängt:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_{\text{gap}}} \quad (4.2)$$

4.1 Vorbereitung

1. Was versteht man unter Kohärenz? Was ist der Unterschied zwischen zeitlicher und räumlicher Kohärenz?

Kohärenz: Hierunter versteht man, dass zwei Wellen ein gleiches bzw. ähnliches Verhalten in Bezug auf die Amplitudenänderung besitzen, das sich lediglich um eine feste Phasenbeziehung unterscheidet. In der Optik bezeichnet man zwei Wellen meist als kohärent, wenn deren Phasendifferenz konstant ist.

4 Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums

Zeitliche Kohärenz: Als zeitliche Kohärenz bezeichnet man die Eigenschaft einer Welle, über ein gewisses Zeitintervall (die Kohärenzzeit τ_c) in vorhersagbarer Art und Weise zu schwingen. Bei Lichtwellen beträgt die Kohärenzzeit typischerweise $\tau_c = 10 \text{ ns}$, was eine Frequenzunschärfe $\Delta\nu = \frac{1}{\tau_c}$ von ca. 100 MHz zur Folge hat. (Zum Vergleich: Sichtbares Licht hat eine Frequenz von ca. 430 – 770 THz)

Räumliche Kohärenz: Diese Eigenschaft ist speziell bei Experimenten wichtig, die die Interferenz zweier Wellen ausnutzen sollen, beispielsweise beim Doppelspaltversuch. Hierbei werden zwei Punkte aus einer Welle herausgegriffen und zur Interferenz gebracht. Allerdings muss die Welle auf dem Gebiet, in dem die Punkte liegen, kohärent sein, damit dies möglich ist. Die maximale Größe dieses Gebiets entspricht dem Ausmaß der räumlichen Kohärenz.

2. Leiten Sie anhand einer Skizze die Interferenzbedingung am Gitter $m\lambda = d \sin \theta$ her.

Wie in der Abbildung zu sehen, gilt für den Gangunterschied Δs zweier

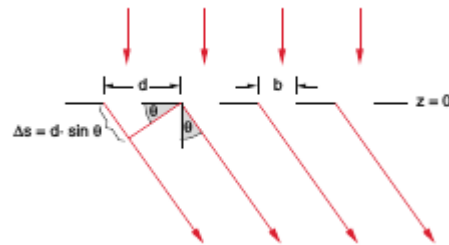


Abbildung 4.1: Interferenz am Gitter

Lichtstrahlen: $\Delta s = d \sin \theta$, wobei d der Spaltabstand und θ der Winkel zwischen einem Lichtstrahl und der Lotrechten zum Spalt sei. Darüber hinaus müssen für konstruktive Interferenz die Strahlen die gleiche Phase aufweisen, also um ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge versetzt sein: $\Delta s = m\lambda, m \in \mathbb{Z}$

Insgesamt ergibt sich also:

$$\Delta s = m\lambda = d \sin \theta$$

3. Wie sieht die Intensitätsverteilung eines Transmissionsgitters aus, das mit monochromatischem Licht beleuchtet wird?

Die Intensitätsverteilung am Gitter wird beschrieben durch:

$$I(\theta) = I_S \cdot \frac{\sin^2[\pi(b/\lambda) \sin \theta]}{[\pi(b/\lambda) \sin \theta]^2} \cdot \frac{\sin^2[N\pi(d/\lambda) \sin \theta]}{\sin^2[\pi(d/\lambda) \sin \theta]}$$

Hierbei sei I_S die Intensität sei, die von einem einzelnen Spalt durchgelassen wird, b sei die Spaltbreite, N die Spaltanzahl, d, λ, θ wie gehabt. Hierbei handelt es sich um eine quadrierte sinc-Funktion als Envelope wie beim Einfachspalt, und eine vom jeweiligen Gitter abhängige Schwingung, die Nebenextrema produziert. Es ergibt sich folgende Intensitätsverteilung:

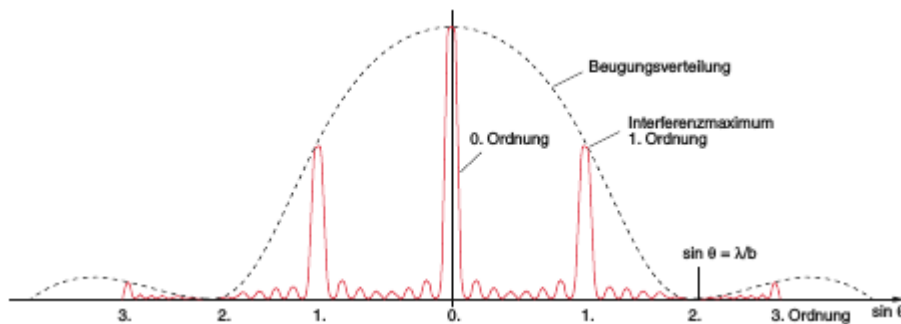


Abbildung 4.2: Intensitätsverteilung am Beugungsgitter

4. Skizzieren Sie den Verlauf der Dichten der Ladungsträger am p-n-Übergang, wenn eine äußere Spannung angelegt wurde.

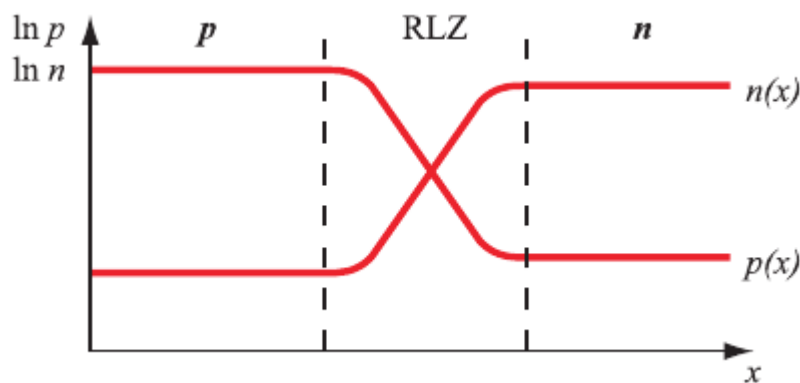


Abbildung 4.3: Ladungsträgerkonzentration bei Spannung in Durchlassrichtung

4.2 Durchführung

4.2.1 Farbfilter

1. Betrachten Sie die Säule mit den farbigen LEDs durch verschiedene Farbfilter. Bei der Verwendung des Rotfilters werden Sie feststellen, dass die rote LED heller zu sein scheint als der Rest. Das Rotfilter läßt das rote Licht also durch und blockiert die anderen Farben. Betrachten Sie die LEDs durch die anderen Filter: welche Farben werden „scharf“ durchgelassen, welche anderen Farbanteile transmittieren eventuell zusätzlich?
2. Wie unterscheidet sich die pinke LED von den anderen einfarbigen LEDs?
3. Erstellen Sie für das Grünfilter ein (subjektives) Intensitätsprofil. Tragen Sie auf der Abszisse die Farben auf (rot, orange, gelb, grün, blau, violett), auf der Ordinate die Intensität (in %)
4. Was verändert sich, wenn Sie zwei verschiedene Filter übereinander legen?
5. Wie verändert sich bei den Filteraufgaben das Licht der weißen LED? Warum?

4.2.2 Bestimmung der Wellenlänge der LEDs

1. Betrachten Sie die LED-Säule durch die Gitter. Neben der senkrechten Reihe von LEDs sehen Sie links und rechts davon virtuelle Bilder der LEDs.
 - a) Warum ist das virtuelle Bild nicht genauso punktförmig, wie das Urbild? Warum erscheint das virtuelle Bild ellipsenförmig mit einer "Verschmierung" der Farbe?
 - b) Wie kann man erklären, dass der Abstand der virtuellen Bilder von der Mittelsenkrechten von der Farbe des Lichtes abhängt?
2. Befestigen Sie das Din A3-Blatt an der Halterung (y-Richtung) und stellen Sie das Gitter in einem festen Abstand vor das LED-Array (x-Richtung). Bestimmen Sie mithilfe der Winkelfunktionen und der Vorbereitungsaufgaben die Wellenlänge der LEDs Hinweis: die LEDs weiß, pink, UV und IR können so nicht ausgemessen werden - warum nicht?
3. Machen Sie eine Fehlerbetrachtung Ihrer Meßanordnung.

4.2.3 Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums

1. Messen Sie die Vorwärtsspannungen der LEDs und tragen Sie sie gegen ihre Frequenz auf.
2. Bestimmen Sie daraus das Planck'sche Wirkungsquantum.
3. Bei diesen Messungen wurden große Fehler in Kauf genommen. Welche sind das, und wodurch werden sie verursacht?

4. Benutzen Sie nun statt des Festspannungs-Steckernetzteils das regelbare Netzteil im Bereich von 0-5V. Erhöhen Sie die Spannung langsam, bis die LED gerade eben zu Leuchten beginnt. Die zugehörige Spannung ist die Spannung der LED. Wiederholen Sie die Messungen, indem Sie die Spannungen der LEDs gegen die Frequenz auftragen.
5. Bestimmen Sie das Planck'sche Wirkungsquantum und diskutieren Sie die Fehler.

5 Gekoppelte Pendel

Gekoppelte Pendel sind solche Pendel, zwischen denen ein Energieaustausch stattfindet. Die dadurch ausgeführten Schwingungen werden auch Koppelschwingung genannt. In jedem Pendel wirkt ein Richtmoment, das durch die Schwerkraft hervorgerufen wird und bestrebt ist, das Pendel in die Ruhelage zurückzuziehen. Außerdem macht sich die vorhandene Kopplung in Form eines zusätzlichen Richtmoments bemerkbar, das so wirkt, dass die Feder möglichst entspannt wird. Häufig versteht man unter gekoppelten Pendeln zunächst die Wechselwirkung zwischen zwei Pendeln. Das Konzept lässt sich jedoch auf beliebig viele Pendel anwenden. Mehrere gleiche Pendel, die in einer Reihe angeordnet mit ihren unmittelbaren Nachbarn wechselwirken, bezeichnet man als Schwingerkette. Das Richtmoment D ist bei einer mechanischen Torsion die Proportionalitätskonstante zwischen dem anliegenden Drehmoment M und dem Drehwinkel ϕ :

$$\vec{M} = D\vec{\phi}$$

Die Kreisfrequenzen der harmonischen Pendelbewegungen:

$$\omega_{gl} = \sqrt{\frac{g}{L}}$$
$$\omega_{geg} = \sqrt{\frac{g + 2k}{L}}$$

Schwebungsdauer T_s :

$$T_s = 2 \cdot \frac{T_{gl} \cdot T_{geg}}{T_{gl} - T_{geg}}$$

Der Kopplungsgrad K ist ein Maß für die Stärke der Kopplung und ist gegeben durch:

$$K = \frac{Dr^2}{D + Dr^2}$$

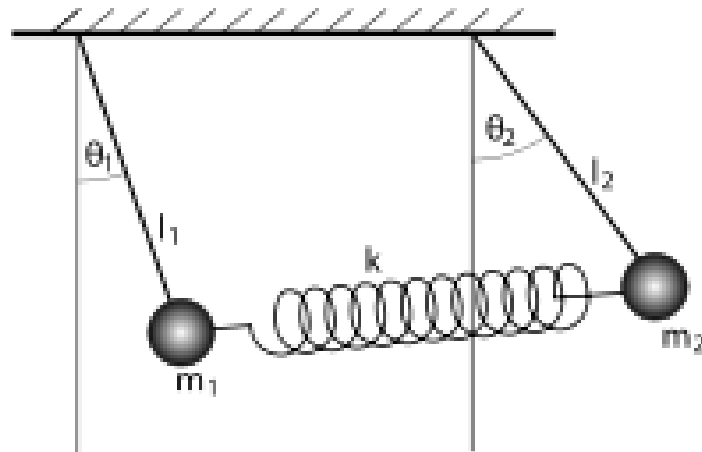


Abbildung 5.1: Gekoppelte Pendel

5.1 Fragen zur Vorbereitung

1. Ist die Eigenkreisfrequenz ω_{geg} bei gegenphasiger Schwingung kleiner, gleich oder größer als bei gleichsinniger Schwingung ω_{gl} ?

Bei gleichsinniger Schwingung ändert sich die Länge der Feder und somit ihre Spannung nicht. Somit werden keine zusätzlichen Drehmomente auf die Pendel ausgeübt. Sie schwingen dann unabhängig voneinander: $\omega_{gl} = \omega_0$ (Diese Frequenz würde sich auch ohne Kopplungsfeder einstellen.)

Bei gegensinniger Schwingung wird die Feder periodisch verformt und übt zusätzliche zeitlich veränderliche Drehmomente auf die Pendel aus. Je weiter z.B. beide Pendel nach außen schwingen, desto stärker werden sie von der Feder zurückgezogen. Es ergibt sich eine symmetrische Schwingung der beiden Pendel, deren Eigenkreisfrequenz ω_{geg} durch die zusätzlichen Drehmomente allerdings größer ist als ω_0 .

2. Welche Bedeutung haben gekoppelte Schwingungen in der Molekülphysik?

In Molekülen kommt es zu unterschiedlich starken Bindungen zwischen den einzelnen beteiligten Atomen. Diese kann man sich als unterschiedlich starke Federn vorstellen. Also schwingt dann bei Anregung nicht nur ein Atom oder eine isolierte Bindung, sondern durch Kopplung der Bindungen auch die umliegenden Bindungen bzw. Atome.

3. Wie kann man Schwebungen zum Stimmen von Musikinstrumenten verwenden? Warum eignet sich diese Methode insbesondere bei tiefen Frequenzen?

Das Instrument wird solange auf den Kammerton als Referenzton eingestimmt, bis keine Schwebung mehr zu hören ist. Bei Schwebung treten Lautstärkeschwankungen auf. Bei hohen Frequenz sind sie zu schnell aufeinander folgend und somit schwerer zu erkennen. Deswegen eignet sich diese Methode besonders bei tiefen Frequenzen.

4. Wie kann man mit Schwebungen sehr hohe Frequenzen messen?

Voraussetzung ist, eine Schwingung gleicher Amplitude und ähnlicher Frequenz erzeugen zu können. Überlagert man die zu messende Schwingung mit der Referenzschwingung, so entsteht eine Schwebung, deren Schwebungsfrequenz sich weit unter der zu messenden Frequenz befindet und somit einfach zu bestimmen ist. Mit Hilfe der nun vorhandenen Schwebungsfrequenz und der Referenzfrequenz kann die noch unbekannte Frequenz erschlossen werden.

5. Wie kann mittels eines sog. FRAHMschen Schlingertanks die Schlingerbewegung eines großen Schiffs verringert werden (Schiffs-Stabilisator)?

Ein Schlingertank ist ein mit Wasser gefüllter Tank im Rumpf eines Schiffes, der Schwan-
kungen um die Längsachse (das sogenannte Rollen) dämpfen soll.

Der von Frahm im Jahr 1910 patentierte Flüssigkeitsdämpfer besteht aus einem Uförmigen Rohrsystem gefüllt mit z.B. Wasser. Der Flüssigkeitsdämpfer diente ursprünglich zur Dämpfung der Rollbewegung von Schiffen und gilt als einer der ersten Schwingungsdämpfer. Durch die Strömung der Flüssigkeitssäule wird die gleiche dämpfende Wirkung wie bei den mechanischen Schwingungsdämpfern verursacht. Die Eigenfrequenz sowie das Dämpfungsverhalten des Flüssigkeitsdämpfers werden über die Geometrie des Rohrsystems bestimmt.

Im Wesentlichen ist es ein Wasserpendel, das auf die Eigenresonanz des Schiffes abgestimmt ist. Treffen seitlich Wellen auf das Schiff, sind im Resonanzfall die Phase der Schiffsschwingung und die der stoßenden Wellen um $\pi/2$ verschoben. Nun bewegt sich das Wasser im Tanksystem (Zwei miteinander verbundene Tanks an den Seiten des Schiffes). Stimmt die Eigenfrequenz des Wasserpendels mit dem des Schiffes überein, ergibt sich noch eine weitere Phasenverschiebung um $\pi/2$. Letztendlich addieren sich die beiden Phasenverschiebung zu $\pi = 180$ Grad, sodass die gegenphasige Bewegung die Schlingerbewegung des Schiffes dämpft.

5.2 Durchführung

Bauen Sie ein gekoppeltes Pendel auf. Achten Sie insbesondere auf die Nadellager der beiden Pendel: die Nadeln sind sehr spitz, daher empfindlich; darüber hinaus könnten Sie sich bei unsachgemäßem Umgang an den Spitzen verletzen. Die Kopplungsfeder wird vorerst noch nicht verwendet. Verbinden Sie die Winkelsensoren mit dem Messverstärker (Verstärkungsfaktor 10). Schließen Sie den Ausgang des Messverstärkers an das Oszilloskop und an das USB-Multimeter an. Über das USB Multimeter können Sie die Daten mit einer Auflösung von 2 Hz in eine Datei schreiben. Die Daten werden anschließend über die Datenvisualisierung qtiplot ausgewertet. Achtung: der Dezimalpunkt des Datensatzes muss ggfs. in ein Dezimalkomma ersetzt werden, damit es von qtiplot richtig interpretiert werden kann!

- 1. Justieren Sie bei absolutem Stillstand der Pendel den Offset der Winkelsensoren auf 0,0V.

5 Gekoppelte Pendel

- 2. Lenken Sie nun eines der Pendel leicht aus und beobachten Sie die Schwingung. Nehmen Sie über die Winkelsensoren und den Messverstärker einen Datensatz auf. Bestimmen Sie die Schwingungsdauer $T_{01} = \frac{2\pi}{\omega_{01}}$. Wiederholen Sie den Messvorgang für das zweite Pendel und stellen Sie sicher, dass im Rahmen der Messgenauigkeit $T_{01} = T_{02}$ gilt.
- 3. Verbinden Sie nun die Pendel über die Kopplungsfeder miteinander. Notieren Sie sich die Position der Befestigungsstelle.
- 4. Zeichnen Sie die Schwingung auf, wenn beide Pendel in Phase sind und bestimmen Sie daraus die Periodendauer T_{gl} .
- 5. Zeichnen Sie die Schwingung auf, wenn beide Pendel gegenphasig sind und bestimmen Sie daraus die Periodendauer T_{geg} .
- 6. Lenken Sie nun ein Pendel aus der Ruhelage aus und erzeugen so gekoppelte Schwingungen. Zeichnen Sie die gekoppelten Schwingungen auf und bestimmen Sie daraus die Oszillationsperiode T_m und die Schwebungsdauer T_S .
- 7. Vergleichen Sie die erhaltenen Werte mit denen, die Sie für die natürlichen Perioden T_{gl} und T_{geg} zuvor berechnet haben. Berücksichtigen Sie eine kurze Fehlerbetrachtung.
- 8. Bestimmen Sie den Kopplungsgrad, indem Sie ein Pendel um eine bestimmte Strecke aus der Ruhelage auslenken und die Auslenkung des anderen Pendels messen. Wiederholen Sie die Messung für mindestens drei unterschiedliche Auslenkungen, sofern Sie noch über ausreichend Zeit verfügen.
- 9. Wiederholen Sie Aufgabe 8 bis 6 für einen andern Kopplungsgrad, indem Sie die Feder an einem anderen Punkt der Pedelstange befestigen.

6 Spezifische Ladung e/m des Elektrons

In diesem Teil des Praktikums soll die sogenannte spezifische Ladung des Elektrons bestimmt werden. Als spezifische Ladung bezeichnet man gemeinhin die Ladung pro Masse eines Teilchens. Diese Größe findet in mehreren Bereichen der Physik Anwendung, beispielsweise in der Massenspektrometrie, wo Analyten ionisiert und dann nach dem Kehrwert der spezifischen Ladung sortiert werden.

Hier ist allerdings die Möglichkeit wichtiger, über die Bestimmung des Verhältnisses $\frac{e}{m}$ auf die Masse des Elektrons zu schließen. Dies ist möglich, da zum Beispiel über den Millikan-Versuch die Elementarladung e direkt bestimmt werden kann.

Um mit den in diesem Versuch verfügbaren Aufbauten also die spezifische Ladung des Elektrons zu bestimmen, müssen zunächst einige mathematische Zusammenhänge für die involvierten physikalischen Größen bekannt sein:

Die Kräfte auf ein Elektron im elektromagnetischen Feld sind gegeben durch:

$$\vec{F} = e\vec{E} \quad \text{Coulombkraft} \quad (6.1)$$

$$\vec{F} = -e\mu_r\mu_0\vec{v} \times \vec{H} = -e\vec{v} \times \vec{B} \quad \text{Lorentzkraft} \quad (6.2)$$

Nach Durchlaufen einer Potentialdifferenz U besitzt ein Elektron die potentielle Energie:

$$W_{\text{pot}} = eU \quad (6.3)$$

Im Gegensatz dazu verrichtet die Lorentzkraft im Falle der Magnetostatik keine Arbeit am Teilchen. Aus der Energieerhaltung ergibt sich daher:

$$\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2U} \quad (6.4)$$

Da davon ausgegangen werden kann, dass die Bewegung des Elektrons in einer Ebene stattfindet, die senkrecht zu \vec{B} ist, lässt sich weiterhin schreiben:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2} \quad (6.5)$$

6.1 Vorbereitung

1. Leiten Sie Gleichung (6.5) über den Zusammenhang zwischen Lorentz- und Zentripetalkraft her. Wie ist der Zusammenhang zwischen e/m und den gemessenen Größen I , U und r ? Eliminieren Sie dabei die magnetische Induktion B durch Verwendung des Kalibrierungsfaktors $K = B/I$ für die Helmholtzspulen! Wie kann bei konstantem Radius r der Wert für e/m graphisch ermittelt werden?

6 Spezifische Ladung e/m des Elektrons

Wie bereits oben klargestellt, kann man annehmen, dass $\vec{v} \perp \vec{B}$. Damit gilt:

$$\begin{aligned}\vec{v} \cdot \vec{B} &= 0 \\ |\vec{v} \times \vec{B}| &= vB\end{aligned}$$

Somit gilt für die genannten Kräfte:

$$\begin{aligned}F_l &= F_z \\ evB &= m \frac{v^2}{r} \\ \frac{e}{m} &= \frac{v}{rB}\end{aligned}\tag{6.6}$$

Mit Gleichung (6.4) gilt:

$$\begin{aligned}\frac{v}{rB} &= \frac{v^2}{2U} \\ v &= \frac{2U}{rB}\end{aligned}$$

Setzt man dies in (6.6) ein, erhält man:

$$\frac{e}{m} = \frac{\frac{2U}{rB}}{rB} = \frac{2U}{r^2 B^2}$$

Nutzt man nun den Kalibrierungsfaktor $K = \frac{B}{I}$, so ergibt sich der Zusammenhang:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 K^2 I^2}$$

Hieraus sieht man sofort, dass e/m graphisch als Steigung eines $U - I^2$ -Diagramms bzw. über den Achsenabschnitt eines $U - I$ -Diagramms mit doppelt logarithmischer Skala bestimmt werden kann.

- Ein Elektron wird durch eine Spannung U beschleunigt und unter einem Winkel α in ein Magnetfeld geschossen wie in Abb. 6.1 gezeigt. Welche Bahn beschreibt das Elektron? Wie ändert sich der Bahnradius? Hinweis: Zerlegen Sie \vec{v} in v_\perp und v_\parallel bzgl. H und berechnen Sie daraus einerseits die Schraubenhöhe und andererseits auch die Umlaufzeit (Larmor-Frequenz).

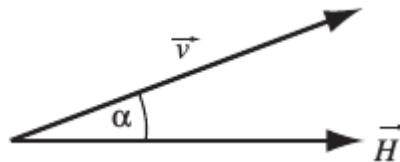


Abbildung 6.1: Elektron im H-Feld

Es gilt für die Geschwindigkeit:

$$v_{\parallel} = v \cos \alpha$$

$$v_{\perp} = v \sin \alpha$$

Hierbei leistet v_{\parallel} keinen Beitrag zur Ablenkung durch die Lorentzkraft, da diese Komponente von \vec{v} parallel zu \vec{H} ist, das Kreuzprodukt verschwindet daher. Lediglich v_{\perp} sorgt für eine Ablenkung des Elektrons, das im Folgenden eine Schraubenbahn beschreibt. Für die Schraubenhöhe h gilt mit der Umlaufzeit T :

$$h = T v_{\parallel} = T v \cos \alpha$$

Für den Radius der Kreisbahn ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht:

$$\begin{aligned} \mu_0 e H v \sin \alpha &= m \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{r} \\ r &= \frac{m v \sin \alpha}{\mu_0 e H} \end{aligned}$$

Daraus lässt sich nun die Umlaufzeit berechnen:

$$T = \frac{2\pi r}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{\mu_0 e H}$$

Setzt man dies in die obige Formel für die Ganghöhe ein, so kommt man schließlich zum Ergebnis:

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{\mu_0 e H}$$

3. Wie kann man den Einfluss des Erdmagnetfelds auf die Elektronenbahn vermeiden?

Am einfachsten kann dies bewerkstelligt werden, wenn man dafür sorgt, dass die Elektronen sich parallel zum Erdmagnetfeld bewegen. Ist dies nicht möglich, so kann Kompensation durch ein zum Erdmagnetfeld entgegengesetzt gleiches Feld erreicht werden.

6.2 Durchführung

6.2.1 Thomson-Röhre

1. Achten Sie darauf, dass während des gesamten Versuchs folgende Maxiamlwerte nicht überstiegen werden:
 - Anodenspannung: 4 kV
 - Spulenstrom: 0,9 A
2. Schließen Sie die Thomson-Röhre an das Hochspannungsnetzgerät an. Erhöhen Sie die Spannung, bis der Elektronenstrahl sichtbar ist (Raum muss abgedunkelt sein!!!).

6 Spezifische Ladung e/m des Elektrons

3. Legen Sie Spannung an die Spulen an und beobachten Sie den Strahlverlauf. Der Elektronenstrahlverlauf ist kreisförmig, die Ablenkung erfolgt in einer Ebene senkrecht zum elektromagnetischen Feld.
4. Variieren Sie nun abwechselnd die Anodenspannung und den Spulenstrom, während Sie die andere Komponente konstant halten. Welche Auswirkung hat dies auf den Radius des Elektronenstrahls? Machen Sie sich die Zusammenhänge klar!
5. Für die folgenden Schritte zur Bestimmung von e/m stellen Sie nun einen Radius ein, der die aufgedruckte Skala schneidet.
6. Bestimmung von r : Der Krümmungsradius r des abgelenkten Elektronenstrahls lässt sich aus dem Austrittspunkt A mittels folgender Gleichung bestimmen:

$$r = \frac{80^2 \text{ mm}^2 + e^2}{\sqrt{2}(80 \text{ mm} - e)} \quad (6.7)$$

wobei sich e direkt an der Skala ablesen lässt (siehe Abb 6.2).

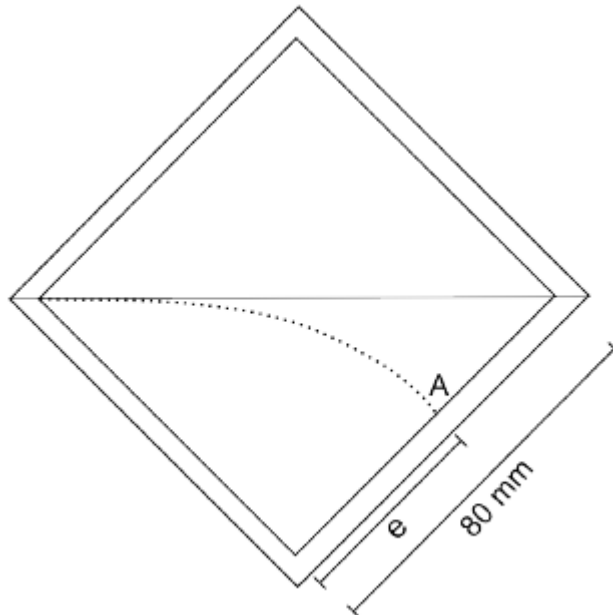


Abbildung 6.2: Bestimmung von r

7. Bestimmung von B : Für die magnetische Flussdichte B des Magnetfeldes bei Helmholtzgeometrie des Spulenpaars und dem Spulenstrom I gilt:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\mu_0 \cdot n}{R} \cdot I = K \cdot I \quad (6.8)$$

Der Kalibrier-Faktor für den angegebenen Aufbau ist $K = 3.5 \frac{\text{mT}}{\text{A}}$.

8. Bestimmen Sie nun aus Spannung, Magnetfeld und Radius einen ersten Wert von e/m . Vergleichen Sie ihn mit dem akzeptierten Wert $e/m = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$. Falls Sie unvenünftig große Abweichungen feststellen, haben Sie wahrscheinlich irgendwo einen Fehler gemacht. Messen Sie erst weiter, wenn Sie diesen beseitigt haben.
9. Nehmen Sie jetzt mehrere Wertepaare für I und U auf, wobei Sie darauf achten, den Radius r konstant zu lassen.
10. Machen Sie für Ihre Messungen eine genaue Fehlerbetrachtung, insbesondere unter Berücksichtigung der verschiedenen Wichtungen verschiedener Wertepaare. Beachten Sie dabei, dass auch die Bestimmung des Radius r ungenau ist. Legen Sie diesen Fehler auf die Wertepaare I und U um. (Warum geht das?)
11. Bestimmen Sie die spezifische Ladung e/m eines Elektrons graphisch unter Berücksichtigung der Messfehler.

6.2.2 Doppelstrahlröhre

1. Achten Sie darauf, dass während des gesamten Versuchs folgende Maximalwerte nicht überstiegen werden:
 - Plattenspannung: 45 V
 - Spulenstrom: 0,4 A
2. Raumbeleuchtung abdunkeln, Heizspannung U_F von 7 V einstellen und ca. 1 Minute warten bis sich die Temperatur der Heizung stabilisiert hat.
3. Erhöhen Sie nun die Anodenspannung U_A auf 100 V. Ohne anliegendes Magnetfeld erkennen Sie einen leuchtenden Strich.
4. Stellen Sie den Spulenstrom I_H so ein, dass ein geschlossener Kreis sichtbar wird. Beschreiben Sie, warum sich der anfänglich beobachtete Strich bei Erhöhung des Magnetfeldes dreht und zusammenzieht.
5. Erhöhen Sie die Plattenspannung und beobachten Sie dessen Effekt auf den sichtbaren Elektronenkreis.
6. Nachdem Sie sich mit den Auswirkungen des Spulenstroms und der Plattenspannung auf die Elektronenbahn vertraut gemacht haben, variieren Sie nun beide Parameter um den Elektronenkreis möglichst genau an den Fluoreszenzschirm anzuschmiegen. Errechnen Sie unter Ausnutzung der Formel (6.5) einen Wert für e/m . Schätzen Sie hierfür den Radius der Elektronenbahn ab (Tip: der Durchmesser des Glaskolbens beträgt 130 mm). Das Magnetfeld lässt sich durch die Helmholtz-Anordnung über folgende Beziehung bestimmen:

$$B^2 = 17,39 \cdot 10^{-6} \cdot I_H^2$$

6 Spezifische Ladung e/m des Elektrons

7. Errechnen Sie e/m für drei weitere Radian, wobei Sie die Plattenspannung konstant halten.
8. Fehlerbetrachtung: Der kreisförmige Strahl ist sichtbar durch Photoemission. Warum ist der Fehler bei der Bestimmung von e/m immer auf der negativen Seite?