

# **B-Praktikum**

Fabian Haneder

09.11.2016



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Optische Spektroskopie</b>	<b>5</b>
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
<b>2</b>	<b>Lichtbeugung an Spalt und Gitter</b>	<b>15</b>
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
<b>3</b>	<b>Optische Geräte</b>	<b>21</b>
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
<b>4</b>	<b>Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums</b>	<b>29</b>
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
<b>5</b>	<b>Gekoppelte Pendel</b>	<b>35</b>
5.1	Fragen zur Vorbereitung	36
5.2	Durchführung	37

<b>6</b>	<b>Spezifische Ladung <math>e/m</math> des Elektrons</b>	<b>39</b>
6.1	Vorbereitung . . . . .	39
6.2	Durchführung . . . . .	41
6.2.1	Thomson-Röhre . . . . .	41
6.2.2	Doppelstrahlröhre . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Ferromagnetismus</b>	<b>45</b>
7.1	Vorbereitungsaufgaben . . . . .	45
7.2	Durchführung . . . . .	49
7.2.1	Aufgabenstellungen . . . . .	50
<b>8</b>	<b>Polarisation des Lichts</b>	<b>53</b>
8.1	Vorbereitung . . . . .	54
8.2	Durchführung . . . . .	58
8.2.1	Doppelbrechung . . . . .	58
8.2.2	Gesetz von Malus . . . . .	58
8.2.3	$\lambda/4$ -Plättchen . . . . .	59
8.2.4	$\lambda/2$ -Plättchen . . . . .	59
8.2.5	selbstgebaut... . . . .	60
8.2.6	Beobachtungen . . . . .	60
<b>9</b>	<b>Optisches Filtern</b>	<b>61</b>
9.1	Fragen und Aufgaben . . . . .	61
9.2	Durchführung . . . . .	66

# 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?

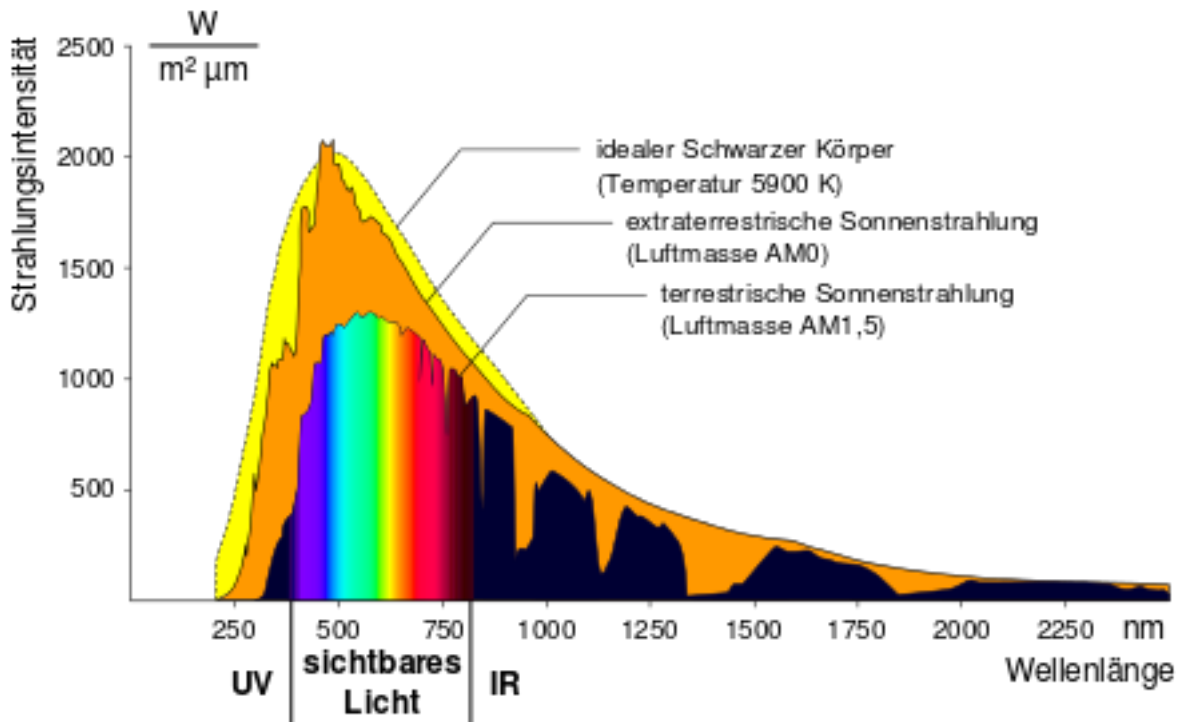


Abbildung 1.1: Intensitätsspektrum eines sonnenähnlichen Schwarzkörpers

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	$\lambda$ [nm]	Element
<b>A</b>	760.8	O
<b>B</b>	686.7	O
<b>C</b>	656.3	H
<b>D<sub>1</sub></b>	589.6	Na
<b>D<sub>2</sub></b>	589.0	Na
<b>E</b>	527.0	Fe
<b>F</b>	486.1	H
<b>G</b>	430.8	Fe
<b>H</b>	396.8	Ca
<b>K</b>	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  $\lambda$  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  $\phi$ :

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

### 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  $\phi$  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  $\delta$  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 Innenseite 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 einfangen 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:

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

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

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

$$(l = \text{Tubulänge})$$

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

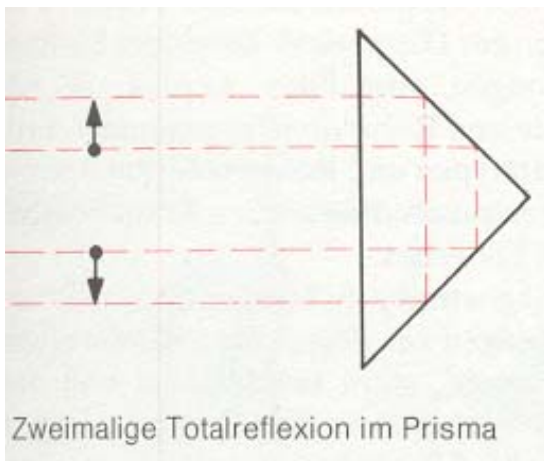
$$V_{\text{Holländisches Fernrohr}} = \frac{f_{\text{Objektiv}}}{|f_{\text{Okular}}|}$$

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

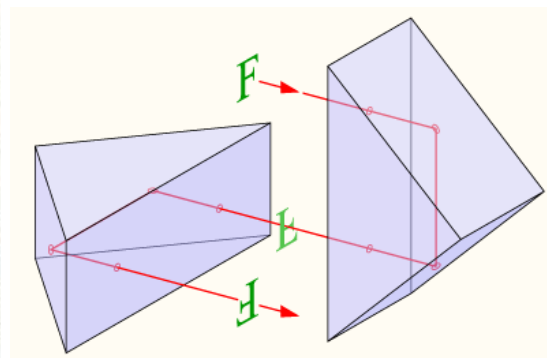
Bei einer Lupe beträgt der ideale Abstand zum Auge 25 cm, wenn der Gegenstand im Brennpunkt liegt. Liegt der Gegenstand zwischen Brennpunkt und Linse, ist das Auge angespannt, man muss das Auge auch näher an die Linse bringen. Falls sich der Gegenstand hinter der Brennweite befindet, kann er nicht mehr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

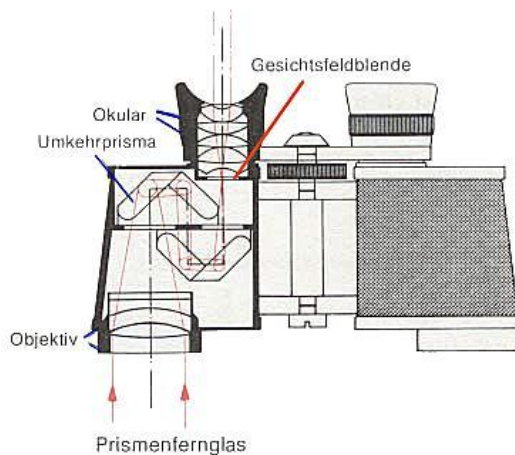
### 3 Optische Geräte

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.

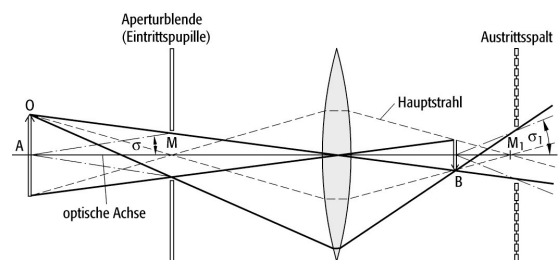
6. Erläutern Sie anhand einiger einfacher optischer Abbildungsanordnungen die Begriffe Apertur und Gesichtsfeldblende. Was will man mit ihnen bezwecken?

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

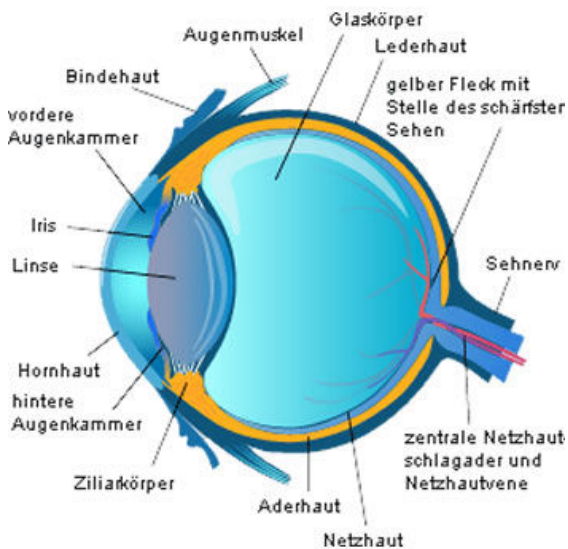


Abbildung 3.1: Anatomie des Auges

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  $f = 500\text{ mm}$ ,  $60\text{ mm}$  und  $f = 40\text{ mm}$ ,  $10\text{ mm}$  Bikonvexlinse  $f = 500\text{ mm}$ ,  $38\text{ mm}$  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  $\psi$  verlassen auf einen Punkt am Beobachtungsschirm fokussiert. Die Vergrößerung  $V$  des Mikroskops kann bestimmt werden aus dem Verhältnis des Winkels  $\psi$  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  $\lambda$  und der Frequenz  $\nu$  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  $E_{\text{gap}}$  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  $\tau_c$ ) 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  $\Delta s$  zweier

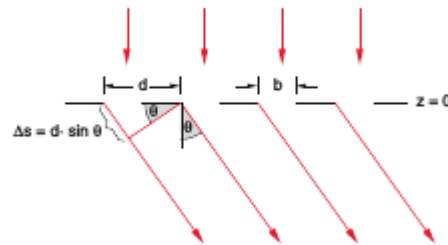


Abbildung 4.1: Interferenz am Gitter

Lichtstrahlen:  $\Delta s = d \sin \theta$ , wobei  $d$  der Spaltabstand und  $\theta$  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,  $d, \lambda, \theta$  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:

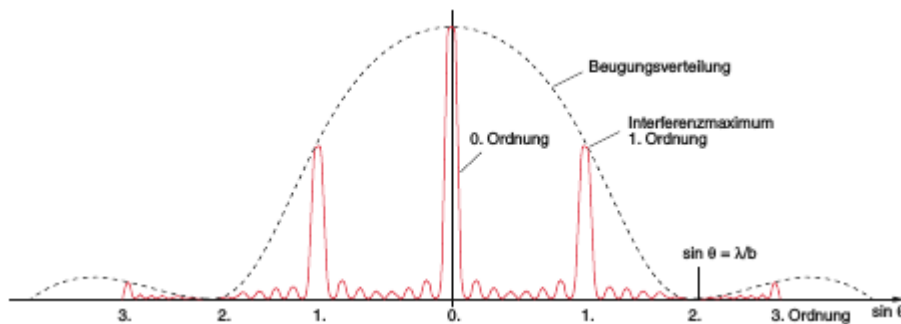


Abbildung 4.2: Intensitätsverteilung am Beugungsgitter

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

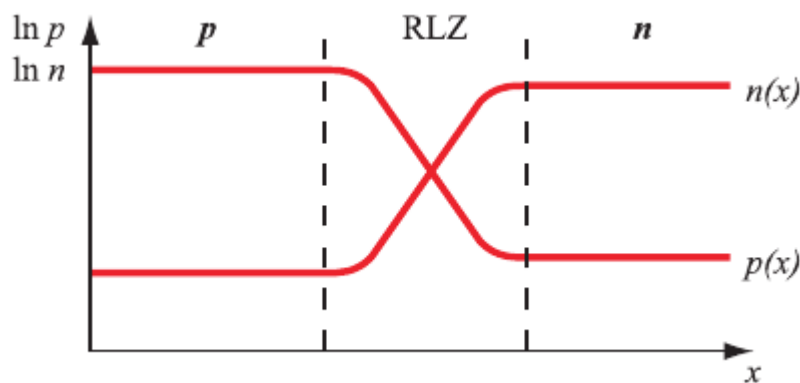


Abbildung 4.3: Ladungsträgerkonzentration bei Spannung in Durchlassrichtung

## 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  $\phi$  :

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

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:

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

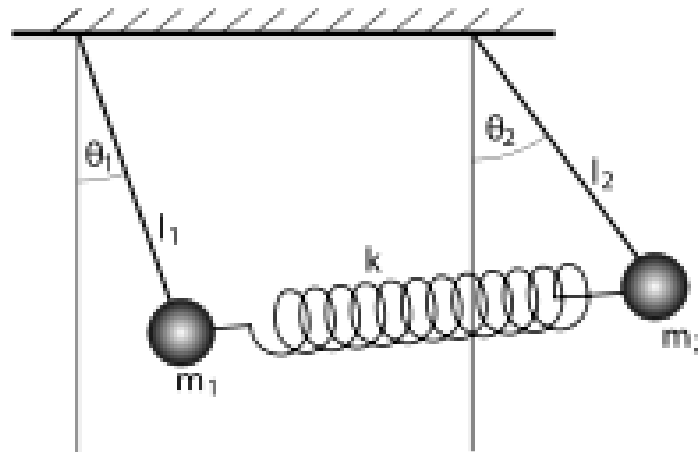


Abbildung 5.1: Gekoppelte Pendel

### 5.1 Fragen zur Vorbereitung

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

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  $\omega_{geg}$  durch die zusätzlichen Drehmomente allerdings größer ist als  $\omega_0$ .

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 Schwingungs- dämpfer. 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 Rohrsys- tems bestimmt.

Im Wesentlichen ist es ein Wasserpendel, das auf die Eigenresonanz des Schiffes ab- gestimmt 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  $\alpha$  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).

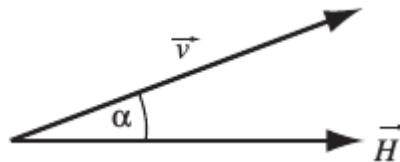


Abbildung 6.1: Elektron im H-Feld



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).

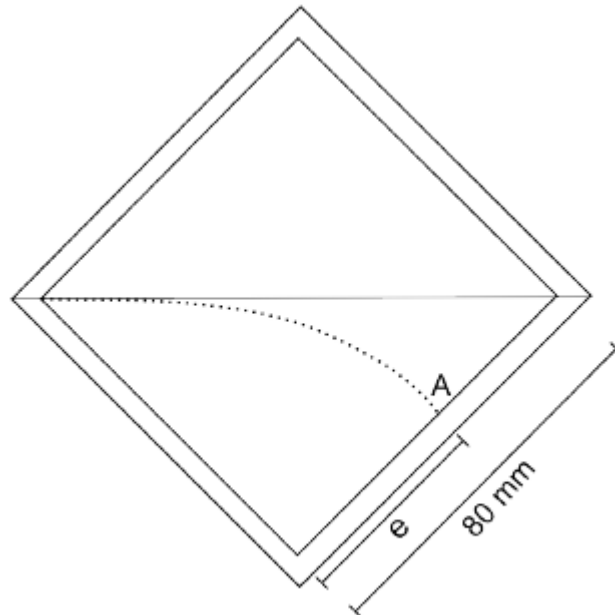


Abbildung 6.2: Bestimmung von  $r$

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?

# 7 Ferromagnetismus

Ferromagnetismus (von lat.: ferrum = Eisen und Magnet) ist die im Alltag am meisten vorkommende Form des Magnetismus, so wie er z.B. in Hufeisen- und Kühlschrankmagneten auftritt. Die Anziehungskraft zwischen einem Magneten und einem ferromagnetischen Material ist verantwortlich für den Großteil der magnetischen Erscheinungen des Alltags.

Ein Material wird „ferromagnetisch“ genannt, wenn es in einem externen Magnetfeld selbst magnetisiert wird und diese Magnetisierung auch noch eine Zeit lang beibehält, nachdem das externe Magnetfeld entfernt wurde. Ein solches Material wird von einem Magneten angezogen. Das bekannteste Beispiel hierfür ist Eisen. Die meisten Metalle sind nicht ferromagnetisch und sind daher weder (in ferromagnetischer Weise) magnetisierbar, noch werden sie von einem Magneten angezogen, z.B. Aluminium, Kupfer, Messing, Silber, Gold. Im Alltag lässt sich daher mit einem Magneten leicht prüfen, ob ein metallener Gegenstand aus Eisen ist oder nicht. Eine Ausnahme hiervon stellen austenitische Legierungen dar, die Bestandteil vieler nichtrostender Stähle sind. Ein austenitisches Gefüge ist nicht ferromagnetisch, obwohl es hauptsächlich aus Eisen besteht.

## 7.1 Vorbereitungsaufgaben

- Machen Sie sich die Einheiten von  $B$ ,  $H$ ,  $M$ ,  $\phi$ ,  $\mu$ ,  $\mu_0$ ,  $\mu_r$  und  $j$  klar.

		Einheit
magnetische Flussdichte	$[B]$	$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{As}}{\text{m}^2}$
magnetische Feldstärke	$[H]$	$1 \frac{\text{A}}{\text{m}}$
Magnetisierung	$[M]$	$1 \frac{\text{A}}{\text{m}}$
magnetischer Fluss	$[\phi]$	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ As}$
magnetische Feldkonstante	$[\mu_0]$	$\pi \cdot 10^{-27} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$
relative Permeabilität	$[\mu_r]$	$1 \frac{\text{H}}{\text{M}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$
elektrische Stromdichte	$[j]$	$1 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$

- 2. Leiten Sie die Beziehung zwischen  $\mu$  und  $\chi$  her.  
magnetische Suszeptibilität  $\chi$

$$B = \mu_0(M + H) = \mu_0 \cdot H(\chi + 1) = \mu_0 \mu_r H$$

→ Permeabilität:  $\mu = \chi + 1$

- 3. Beschreiben Sie die Unterschiede von Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus. Geben Sie eine mikroskopische Erklärung im Rahmen eines einfachen Atommodells.

Diamagnetismus: In der Physik werden alle Materialien mit negativer magnetischer Suszeptibilität und ohne magnetische Ordnung als diamagnetisch klassifiziert. Diamagnetische Stoffe haben das Bestreben, das Magnetfeld aus ihrem Inneren zu verdrängen. Sie magnetisieren sich gegen die Richtung eines externen Magnetfeldes, folglich ist  $\mu_r < 1$ .

Der Zustand der Teilchen ändert sich bei einer Magnetisierung so, dass ein magnetisches Moment entsteht, das entgegen dem äußeren Magnetfeld entgegenwirkt.

Paramagnetismus: In paramagnetischen Stoffen richten sich die atomaren magnetischen Momente in externen Magnetfeldern aus und verstärken damit das Magnetfeld im Inneren des Stoffes. Die Magnetisierung ist also positiv und damit  $\mu_r > 1$ .

Legt man ein äußeres Magnetfeld an, so werden die mikroskopischen magnetischen Momente ausgerichtet, ohne sich dabei zu beeinflussen. Je stärker das äußere Feld ist, umso parallel richten sich die magnetischen Momente zum Magnetfeld aus.

Ferromagnetismus: Ferromagneten richten ihre magnetischen Momente parallel zum äußeren Magnetfeld aus, tun dies aber in einer stark verstärkenden Weise.

Unabhängig vom externen Feld besitzt ein Ferromagnet eine spontane Magnetisierung, das externe Feld gibt somit nur die Richtung der Magnetisierung vor.

Mikroskopisch gesehen liegt der Unterschied zwischen einem Ferro- und einem Paramagneten darin, dass Ferromagneten eine parallele Ordnung aufweisen, die durch Wechselwirkung unter den einzelnen Momenten auch ohne externes Feld erhalten bleiben.

- 4. Was sind typische Werte von  $\mu_r$  für magnetische Materialien ?

ideal diamagnetischer Leiter: 0

Blei/Zinn: 0,999 (diamagnetisch)

Platin (paramagnetisch):  $1 + 2,6 \cdot 10^{-4}$

Aluminium (paramagnetisch):  $1 + 2,2 \cdot 10^{-5}$

Eisen (paramagnetisch): 300 bis 10000

Kobalt (paramagnetisch): 80 bis 200

- 5. Sind die Vektoren  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  stets parallel? Wie könnte man gegebenenfalls die Nicht-Parallelität mathematisch ausdrücken?

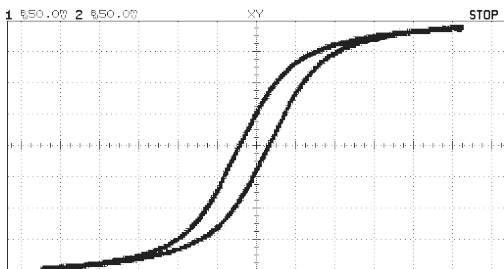
Den magnetischen Fluss kann man durch Erzeugen eines neuen magnetischen Feldes verändern, womit  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  nicht immer parallel sein müssen. Für ferromagnetische Stoffe gilt, dass  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  immer parallel sind, nicht aber für diamagnetische Stoffe. Da  $\mu_r$  als Tensor darstellbar ist, gilt  $\vec{B} = \vec{H} \mu_0 \mu_r$  dennoch.

- 6. Wie groß ist die „differenzielle Permeabilität“  $\partial B / \partial H$ , wenn die Sättigungsmagnetisierung erreicht ist?

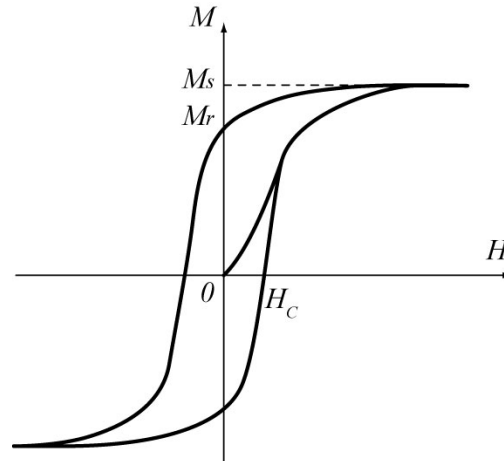
Beim Erreichen der Sättigungsmagnetisierung gilt:  $\partial B/\partial H = 0$ .

- 7. Skizzieren Sie qualitativ  $B(H)$  und  $M(H)$  für ferromagnetische Stoffe. Was ist der Unterschied zwischen den beiden Graphen?

Der Unterschied besteht unter Anderem darin, dass die magnetische Flussdichte zum



(a) Magnetische Flussdichte/Magnetische Feldstärke



(b) Magnetisierung/Magnetische Feldstärke;  
 $M_s$ =Sättigungsmagnetisierung

Schluss weiterhin linear ansteigt, während die Magnetisierung nach der Sättigung konstant bleibt.

- 8. Wie kann man einen ferromagnetischen Körper in einen entmagnetisierten Zustand bringen?  
Einen ferromagnetischen Körper kann man dadurch entmagnetisieren, dass man ihn zum Beispiel erhitzt oder erschüttert. Auch durch die Wahl eines schnellen Wechselfeldes und langsames Zurückfahren der Amplituden ist eine Entmagnetisierung möglich.
- 9. Was ist ein „Querspalt“ und was ein „Längsspalt“? Wozu verwendet man diese?  
Als Längs- bzw. Querspalt werden Hohlräume einer magnetischen Probe bezeichnet, in denen  $\vec{H}$  bzw.  $\vec{B}$  gemessen werden. Der Querspalt liegt senkrecht zu  $\vec{B}$ , da sich das B-Feld in dieser Richtung nicht ändert (siehe Maxwellgleichungen). Der Längsspalt liegt wiederum parallel zu  $\vec{H}$ , da sich so das wirbelfreie H-Feld nicht ändert.
- 10. Warum müssen die Spalte zur Messung von B und H in ferromagnetischem Material möglichst eng sein?  
Die Spalte zur Messung von B und H müssen in ferromagnetischem Material möglichst eng sein, damit die Magnetisierungsverteilung durch die Hohlräume nicht sehr gestört wird.

- 11. Ist  $B$  in einem nicht-durchgehenden Querspalt genauso groß wie in einem durchgehenden?

In einem nicht-durchgehenden Querspalt ist  $B$  kleiner als in einem durchgehenden, da das Magnetfeld von der "Behinderung", z.B. einem Eisenkern mitgetragen wird.

- 12. Erklären Sie die Wirkungsweise einer Hallsonde. Was wird mit ihr gemessen? Wie kann man geometriebedingte Nullfeldsignale vermeiden?

Die Wirkungsweise einer Hall-Sonde beruht auf dem Prinzip des Hall-Effektes und dient der Messung von Magnetfeldern und Strömen. Man bringt die stromdurchflossene Sonde in ein senkrecht dazu stehendes Magnetfeld und erhält als Ausgangsgröße eine Spannung, die proportional zur magnetischen Feldstärke und zum Strom ist. Auf diese Weise lässt sich bei bekanntem Strom das Magnetfeld ausmessen. Auf der anderen Seite dient die Hall-Sonde auch als Stromstärkemessgerät, wenn das Magnetfeld durch einen stromdurchflossenen Leiter (Spule) erzeugt wird. Hier lässt sich die Stromstärke potentialfrei bestimmen. Eine quaderförmige Sonde, meist bestehend aus einem Halbleiter, wird von einem möglichst konstanten elektrischen Strom  $I$  in  $x$ -Richtung durchflossen. Stromfluss bedeutet hier, dass sich die verfügbare Anzahl freier Elektronen  $n$  entgegen der Richtung des extern angelegten elektrischen Feldes mit einer mittleren Geschwindigkeit  $v$  bewegt. Die Löcher bewegen sich entsprechend entgegengesetzt. In der bestimmten Zeit  $t$  bewegen sich nun alle Ladungsträger, die im Volumen mit der Grundfläche  $A$  und einer Höhe  $h$  enthalten sind, durch die Grundfläche  $A$  hindurch.

Bringt man die Sonde nun in ein magnetisches Feld der Flussdichte  $B$  in  $z$ -Richtung, so wirkt auf alle orthogonal zum Feld bewegten Ladungen eine Lorentzkraft. Die Ladungen werden an den beiden Seiten der Sonde getrennt. Es entsteht also ein elektrisches Feld in  $y$ -Richtung und es wirkt auf die bewegten Ladungen eine Kraft. Kompensiert diese Kraft die Lorentzkraft, sind die Bahnen der bewegten Ladungsträger wieder geradlinig und es kann in  $y$ -Richtung die Hallspannung abgegriffen werden. Die abgegriffene Spannung ist also proportional zur magnetischen Flussdichte. Geometriebedingte Nullfeldsignale können mithilfe einer Gegenspannung kompensiert werden.

- 13. Wozu benutzt man eine „transversale“ bzw. eine „longitudinale Hallsonde“?  
Die transversale Hallsonde wird beim Messen des  $B$ -Feldes im Querspalt, die longitudinale beim Messen des  $H$ -Feldes im Längsspalt benutzt.
- 14. Das Magnetfeld einer langen Zylinderspule fällt zu den Spulenden hin ab. Schätzen Sie anschaulich (ohne zu rechnen!) die Grösse des Feldes an den Spulenden im Vergleich zur Feldstärke im Mittelpunkt der Spule ab.  
Man stelle sich zwei Spulen nebeneinander vor, die zusammengesetzt eine lange Spule ergeben. Da sich die Feldlinien an den Enden der Einzelspulen an ihren Enden (also in der Mitte von der langen Spule) addieren, ist das Magnetfeld im Mittelpunkt der Spule etwa doppelt so groß wie an den Spulenden.
- 15. Geben Sie die Formel für die magnetische Feldstärke  $H$  einer langen Spule als



Funktion des Ortes auf der Symmetrieachse an. Stellen Sie diese Abhängigkeit für eine 8cm lange Spule mit Durchmesser  $D = 5,5\text{cm}$ , Windungszahl  $n = 500$  und Stromstärke  $I = 2,5\text{A}$  im Intervall  $\pm 7\text{cm}$  um die Spulenmitte graphisch dar

$$H = \frac{NI}{\sqrt{l^2 + 4r^2}}$$

$$H = \frac{NI}{l} \left( \frac{l+2x}{2\sqrt{D^2 + (l+2x)^2}} + \frac{l-2x}{2\sqrt{D^2 + (l-2x)^2}} \right)$$

$$H = \frac{500 \cdot 2,5\text{A}}{8\text{cm}} \left( \frac{8\text{cm} + 2 \cdot 7\text{cm}}{2\sqrt{(5,5\text{cm})^2 + (8\text{cm} + 2 \cdot 7\text{cm})^2}} + \frac{8\text{cm} - 2 \cdot 7\text{cm}}{2\sqrt{(5,5\text{cm})^2 + (8\text{cm} - 2 \cdot 7\text{cm})^2}} \right) = 18,202\text{A/m}$$

- 16. Welchen Betrag hat das Erdmagnetfeld in Gauss und in Tesla?  
Die Stärke und Richtung des Magnetfeldes variieren mit dem Ort der Messung. Am Äquator zum Beispiel beträgt das Erdmagnetfeld ca.  $30000\mu\text{T} = 30\mu\text{Gs}$ , am Pol etwa das Doppelte.
- 17. Wo werden ferromagnetische Stoffe bzw. der Ferromagnetismus von Stoffen in der Praxis genutzt?  
Ferromagnetische Stoffe bzw. Ferromagnetismus werden z.B. in Elektromagneten, Transformatoren oder elektrischen Speichermedien benutzt. Oft ist hierbei die magnetische Sättigung des Kerns unerwünscht und führt zu einem Abfall des Wirkungsgrades. Um eben diese Sättigung zu verhindern, müssen magnetische Kerne in Transformatoren und Elektromotoren eine Mindestquerschnittsfläche aufweisen. In der Geophysik wird Ferromagnetismus zur Identifizierung von Materialien benutzt.

## 7.2 Durchführung

Zur Durchführung der Versuche stehen Ihnen folgende Geräte zur Verfügung:

## 7 Ferromagnetismus

- Feldmessgerät PHYWE mit transversaler Hallsonde
- Feldmessgerät PHYWE mit longitudinaler Hallsonde
- div. Experimentiertrafos mit Kernen
- Netzgeräte
- Multimeter
- div. Stativmaterial

Achtung! Bitte gehen Sie sehr sorgsam mit den Hallsonden um, sie dürfen keinesfalls verbogen oder geknickt werden! Vor dem Umbau des Eisenkerns bitte den Strom am Netzgerät auf Null zurückdrehen, dann erst ausschalten! Hallsonde entfernen und in die Stativklemmen einspannen!

### 7.2.1 Aufgabenstellungen

#### Test der Hallsonden mit Hilfe des Erdmagnetfelds

Ermitteln Sie die Richtung des Erdmagnetfelds im Raum mit einer Kompassnadel. Testen Sie die Hallsonden durch Messung des Erdmagnetfelds und stellen Sie dabei den Nullpunkt korrekt ein. Halten Sie dazu die Hallsonden a) senkrecht, b) parallel und c) antiparallel zum Erdmagnetfeld. Achten Sie darauf, dass sich keine Eisenteile in unmittelbarer Nähe befinden.

#### Magnetfeld einer Luftspule

Ermitteln Sie die magnetische Feldstärke  $H$  einer Luftspule (Länge  $l = 7,2\text{cm}$ , Durchmesser  $D = 5,5\text{cm}$ , Windungszahl  $n = 500$ ), durch die ein konstanter Strom fließt ( $I = 2,5\text{A}$ ), auf der Symmetrieachse in Abhängigkeit von der Position (in einem Intervall von  $\pm 7\text{cm}$  um die Spulenmitte). Verwenden Sie dazu die longitudinale Hallsonde. Tragen Sie die Messdaten auf mm-Papier auf. Vergleichen Sie den gemessenen Verlauf der Feldstärke graphisch mit der für eine Zylinderspule endlicher Länge bzw. für einen magnetischen Punktdipol theoretisch erwarteten Abhängigkeit.

#### Magnetfeld einer Spule mit geradem Eisenkern

Setzen Sie nun einen geraden Eisenkern mit Längsbohrung und einem angespitzten Ende in die Spule ein und führen Sie die gleichen Messungen durch wie bei Aufgabe fm.5.2. Tragen Sie die Messpunkte in den Graphen von Aufgabe fm.5.2 ein (im gleichen Maßstab, um quantitativ vergleichen zu können). Diskutieren Sie die Veränderung im Feldstärkeverlauf durch Einführung des Eisenkerns mit Hilfe des Hintergrundwissens aus Kap. fm.2.5 Können Sie daraus auf die relative Permeabilität  $\mu_r$  des Eisenkerns folgern?

#### Magnetischer Kreis mit schmalen Luftspalt

Bauen Sie einen magnetischen Kreis mit zwei Spulen à 500 Windungen, einem U-Kern und zwei angespitzten durchbohrten Polschuhen auf ( $l_L = 4\text{mm}$  Luftspalt zwischen den

flachen Enden der Polschuhe) (vgl. Abb. fm.4). Achten Sie auf die Polung der Spulen (die Felder der Einzelspulen sollen sich gegenseitig verstärken anstatt sich zu kompensieren!) Schliesst man die Spulen besser in Reihe oder parallel ans Netzgerät an? Messen Sie die magnetische Feldstärke  $H$  bei fester Stromstärke ( $I = 2,5\text{A}$  in jeder der beiden Spulen) als Funktion des Ortes in der Längsbohrung und einige cm ausserhalb der Bohrung. Achten Sie auf die Vorzeichen der von den Feldmessgeräten angezeigten Werten! Tragen Sie die Messwerte graphisch auf. Diskutieren Sie den gemessenen Verlauf des Feldes längs der Bohrung. Denken Sie dabei an nicht vernachlässigbare Streufelder. Versuchen Sie gegebenenfalls unerwartete Ergebnisse zu interpretieren.

#### Ermittlung der Hysteresekurve eines Eisenkerns von Hand

Messen Sie die magnetische Feldstärke  $H$  und die magnetische Flussdichte  $B$  in Abhängigkeit vom Spulenstrom  $I$  für einen vollen Ummagnetisierungszyklus, ausgehend von der Sättigung. Platzieren Sie dazu die Hallsonden so, dass die Messung am wenigsten durch Streufelder verfälscht wird. Um möglichst weit in die Sättigung zu kommen, können Sie kurzzeitig Spulenströme bis zu  $5\text{A}$  zulassen. Achten Sie unbedingt darauf, dass Sie den Strom nur monoton ändern (warum?). Tragen Sie die Messwerte in ein  $B(H)$ -Diagramm ein.



## 8 Polarisation des Lichts

Als Polarisation des Lichts bezeichnet man die (wohldefinierte) Richtung des elektrischen Feldvektors  $\vec{E}$  im Bezug auf die Ausbreitungsrichtung  $\vec{k}$  der Welle. Wie derartiges Licht erzeugt und nachgewiesen wird, sowie seine Eigenschaften, sollen in diesem Versuch erschlossen werden.

Hierzu soll zunächst die mathematische Beschreibung von elektromagnetischen Wellen wiedergegeben werden. Dies geschieht durch die Maxwellgleichungen und die daraus abgeleiteten elektromagnetischen Wellengleichungen:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (8.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (8.2)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (8.3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8.4)$$

$$\Delta \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (8.5)$$

$$\Delta \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (8.6)$$

Hieraus lässt sich mit der Lichtgeschwindigkeit  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$  leicht die wohlbekannte Lösung in Form einer ebenen Welle verifizieren.

Bei der Polarisation von Licht unterscheidet man hauptsächlich drei Fälle: linear, zirkular und elliptisch polarisiertes Licht. Vom ersten Fall spricht man, wenn die Schwingenebene ortsfest ist, sich also bei der Projektion der Schwingung auf eine zur Ausbreitungsrichtung senkrechte Ebene das Bild einer geraden Linie ergibt. Man erhält diese Form der Polarisation bei der Überlagerung gleichamplitudiger, linear polarisierter Wellen mit Phasendifferenz  $\Delta\varphi = k \cdot \pi$ ,  $k \in \mathbb{Z}$ . Eine weitere Möglichkeit ist die Überlagerung gleich intensiver zirkular polarisierter Wellen. Die Richtung der Polarisation hängt dann von der Phasendifferenz der ursprünglichen Wellen ab.

Der Spezialfall der zirkular polarisierten Welle entsteht dann, wenn amplitudengleiche Wellen mit einer Phasendifferenz  $\Delta\varphi = (k + \frac{1}{2})\pi$ ,  $k \in \mathbb{Z}$  überlagert werden, bzw. bei der Überlagerung zirkular polarisierter Wellen, wobei die eine eine verschwindend geringe Amplitude besitzt. In jedem anderen Fall ergibt sich der allgemeine Fall einer elliptisch polarisierten Welle.

Im Folgenden sollen außerdem Methoden zur Erzeugung polarisierten Lichts diskutiert werden. Hierzu ist zunächst ein weiterer mathematischer Zusammenhang vonnöten, der

die Intensität von Licht beschreibt, das einen idealen Polfilter durchläuft: Das Gesetz von Malus

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta \quad (8.7)$$

Im Fall unpolarisierten Lichtes muss noch über alle möglichen Winkel integriert werden:

$$\langle I \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_0 \cos^2 \theta d\theta = \frac{1}{2} I_0 \quad (8.8)$$

Eine besonders in diesem Versuch, sowie zur Erzeugung sogenannter  $\lambda/4$ - und  $\lambda/2$ -Plättchen wichtige Möglichkeit zur Lichtpolarisation ist die Doppelbrechung in Kristallen mit optischen Achsen. Dies passiert, wenn ein Kristall optisch anisotrop ist und mehrere ausgezeichnete Richtungen besitzt, entlang derer Licht gleicher Wellenlänge, aber unterschiedlicher Polarisation unterschiedlich stark gebrochen werden. So können für die sich aufspaltenden Lichtstrahlen bestimmte Gangunterschiede über die Dicke der Kristallplatte festgelegt werden.

Ein ähnliches Prinzip liegt der optischen Aktivität organischer Moleküle zugrunde. Mittels bereits bekannter Werte für den spezifischen Drehwinkel eines bestimmten Stoffes kann so recht einfach seine Konzentration in einer Lösung bestimmt werden.

## 8.1 Vorbereitung

1. Unter welchen Voraussetzungen sind die Maxwellgleichungen (8.1)-(8.4) gültig?

Die Gleichungen gelten für ungeladene, stromfreie lineare Materialien mit skalaren Größen  $\mu_r, \epsilon_r$ . Im Fall anisotroper Materialien werden diese durch entsprechende Tensoren  $\bar{\mu}_r, \bar{\epsilon}_r$  ersetzt.

2. Unter welchen Bedingungen sind ebene Wellen Lösungen der Maxwellgleichungen?

Die ebenen Wellen müssen die Dispersionsrelation  $\omega = ck$ , sowie die Transversalitätsbedingung  $\vec{E} \cdot \vec{k} = 0$  bzw.  $\vec{B} \cdot \vec{k} = 0$  erfüllen.

3. Zeigen Sie, dass elektromagnetische Wellen Transversalwellen sind.

Betrachte elektromagnetische Wellen der Form:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t)} \\ \vec{B}(\vec{r}, t) &= \vec{B}_0 e^{i(kz - \omega t)} \end{aligned}$$

Im Zweifelsfall kann das zugrundeliegende Koordinatensystem immer so gelegt werden, dass  $\vec{k} \cdot \hat{e}_z = 0$  gilt. Durch Einsetzen in die Maxwellgleichungen (8.1) und (8.2) ergibt sich folgende Bedingung:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{E} &= E_{0,z} e^{i(kz - \omega t)} = 0 & \Rightarrow E_{0,z} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} &= B_{0,z} e^{i(kz - \omega t)} = 0 & \Rightarrow B_{0,z} &= 0 \end{aligned}$$

Die Wellen stehen also senkrecht auf ihrer Ausbreitungsrichtung und sind somit transversal.

4. Warum ist das natürliche Licht unpolarisiert?

Natürliches Licht, wie z.B. Sonnenlicht ist als thermische Strahlung aus vielen Einzelwellen aufgebaut, deren Eigenschaften statistisch verteilt sind, wodurch keine klare Polarisation vorgegeben ist.

5. Nennen Sie die möglichen Polarisationszustände von Licht. Wie kann man diese mathematisch darstellen?

Analog zur Einführung kann Licht linear, zirkular oder allgemein elliptisch polarisiert bzw. ganz unpolarisiert sein. Auch die mathematischen Grundlagen für die ersten beiden Polarisationsarten wurden bereits genannt. Bei elliptisch polarisiertem Licht liegt eine Überlagerung zweier Wellen mit im Allgemeinen unterschiedlicher Amplitude und Phase, aber gleicher Ausbreitungsrichtung vor, während bei unpolarisiertem Licht eine Überlagerung sehr vieler Wellen mit unterschiedlichen Eigenschaften wie Amplitude, Phase, Wellenlänge, Polarisation und Ausbreitungsrichtung möglich ist.

Als Überlagerung bezeichnet man hierbei jeweils die Summe einzelner Teilwellen.

6. Wie kann man einen Linearpolarisator von einer Verzögerungsplatte unterscheiden?

Man bestrahle das zu untersuchende Objekt mit linear polarisiertem Licht. Der Polarisator wird unter Drehung eine veränderliche Lichtintensität transmittieren, bei einem bestimmten Winkel, genauer  $\pm \frac{\pi}{2}$  zur Polarisationsrichtung des Lichtes wird nach dem Gesetz von Malus kein Licht mehr durchgelassen. Bei einer Verzögerungsplatte hingegen wird lediglich die Polarisation des transmittierten Lichts geändert, z.B. wird das Licht gedreht oder zirkulare Polarisation erzeugt. Dies kann durch nachgeschaltete Polfilter oder Verzögerungsplatten mit bekannten Eigenschaften nachgewiesen werden.

7. Welche Eigenschaften haben Linearpolarisator,  $\lambda/2$ - und  $\lambda/4$ -Plättchen? Erklären Sie, welche Polarisationszustände man aus lin. pol. Licht mit einem  $\lambda/2$ - bzw.  $\lambda/4$ -Plättchen erzeugen kann. Welchen Einfluss hat dabei die optische Achse (Vorzugsrichtung) des Plättchens?

Ein Linearpolarisator filtert einfallende Strahlung so, dass nur linear polarisiertes Licht mit festgelegter Polarisationsrichtung durchgelassen wird. Bei Verzögerungsplatten hingegen werden einfallende Lichtstrahlen formal „aufgespalten“ und die unterschiedlichen optischen Weglängen im anisotropen Kristall ausgenutzt, um festgelegte Gangunterschiede zwischen den ausfallenden Strahlen zu erzeugen. Hierbei erzielt ein  $\lambda/2$ -Plättchen einen Phasenversatz von  $\pi$ , ein  $\lambda/4$ -Plättchen entsprechend um  $\frac{\pi}{2}$ . Zudem sind Polarisatoren im Allgemeinen von der Farbe des Lichts unabhängig, während Verzögerungsplatten namensgetreu nur für eine bestimmte Wellenlänge wirksam sind.

Mit ersterem wird linear polarisiertes Licht erneut linear polarisiert ausgegeben, jedoch um den Winkel  $2\alpha$  gedreht, wenn  $\alpha$  der Winkel zwischen Polarisationsrichtung und optischer Achse des Kristalls ist.

Zweiteres erzeugt aus linear polarisiertem Licht i.A. elliptisch polarisiertes. Für  $\alpha = \frac{\pi}{4}$  bzw.  $\alpha = 0$  mit  $\alpha$  wie oben erhält man zirkular bzw. linear polarisiertes Licht. In jedem Fall beschreibt das austretende Licht in einer zur Ausbreitung senkrechten Ebene eine sogenannte Lissajous-Figur.

8. Wie dick muss ein  $\lambda/2$ - oder  $\lambda/4$ -Plättchen aus Glimmer sein, wenn die Wellenlänge des einfallenden Lichtes 589 nm ist?

Es gilt für den Phasenversatz folgende Identität:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}d(n_\gamma - n_\beta)$$

Man benutze die Brechindizes für Glimmer:  $n_\gamma = 1.5993$ ,  $n_\beta = 1.5944$

Durch Umstellung erhält man für  $d$ :

$$d = \frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi(n_\gamma - n_\beta)}$$

Für Phasenversätze  $\Delta\varphi = k\pi$  bzw.  $\Delta\varphi = (k + \frac{1}{2})\pi$  erhält man für die Dicke der jeweiligen Plättchen:

$$d_{\lambda/2} = k \cdot 6.01 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$d_{\lambda/4} = (k + \frac{1}{2}) \cdot 6.01 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

9. Wann nennt man optische Medien isotrop bzw. anisotrop? Geben Sie jeweils zwei Beispiele an.

Isotrope Medien haben in jeder Richtung das gleiche Brechverhalten bzw. den gleichen Brechungsindex. Beispiele sind optisch inaktive Fluide wie Luft oder Wasser.

Anisotrope Medien hingegen besitzen genau diese Eigenschaft nicht, Lichtbrechung ist also von der Durchstrahl- oder Polarisationsrichtung des Lichtes abhängig. Dieses Verhalten ist etwa bei Glimmer oder Kalkspat zu betrachten.

10. Auf ein  $\lambda/4$ -Plättchen aus Quarz fällt Licht einer Natriumlampe ( $\lambda = 589 \text{ nm}$ ). Wie dick ist die Quarzplatte? Welche Frequenz und Wellenlänge haben ordentlicher und außerordentlicher Strahl innerhalb des Kristalls?

Man benutze statt der (unbekannten) Brechungsindizes die bekannte Doppelbrechung von Quarz, die von der Wellenlänge zumindest näherungsweise unabhängig ist:  $\delta = (n_e - n_o) = 0.0091$

Damit ergibt sich für die Dicke der Platte:

$$d = (k + \frac{1}{2})\frac{\lambda}{2\delta} = (k + \frac{1}{2}) \cdot 6.47 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Die Frequenz des Lichtes ist vom Medium unabhängig:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = 5.09 \cdot 10^{14} \text{ THz}$$



Für die Wellenlängen gilt:

$$\lambda_o = \frac{\lambda}{n_o}$$

$$\lambda_e = \frac{\lambda}{n_e}$$

Da die Brechungsindizes bei der angegebenen Wellenlänge unbekannt sind, werden im Folgenden die Brechzahlen für  $\lambda = 590 \text{ nm}$  verwendet. Diese sind:  $n_o = 1.544$ ,  $n_e = 1.553$ . Damit ergibt sich:

$$\lambda_o = 381.4 \text{ nm}$$

$$\lambda_e = 379.3 \text{ nm}$$

11. Die Durchlassrichtung von zwei hintereinander stehenden, idealen Polarisatoren sind um den Winkel  $\alpha_1 = 30^\circ$  gegeneinander verdreht. Auf die Anordnung fällt Licht, dessen Schwingungsrichtung den Winkel  $\alpha_2 = 15^\circ$  mit der Durchlassrichtung des ersten Polarisators bildet. Wie groß ist der Transmissionsgrad dieser Anordnung?

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_1 = 0.70$$

12. Was versteht man unter optischer Aktivität?

Unter optischer Aktivität versteht man die Eigenschaft organischer Materialien wie Zucker oder Milchsäure, die Schwingrichtung linear polarisierten Lichtes um einen bestimmten Winkel zu drehen.

13. Beschreiben Sie den Strahlengang und die Funktionsweise des Nicol'schen Prismas.

Ein negativ einachsiger ( $n_o > n_e$ ) Kristall wird schräg zur optischen Achse

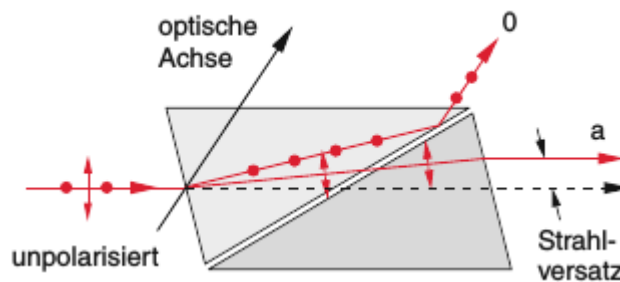


Abbildung 8.1: Strahlengang im Nicol'schen Prisma

durchgeschnitten und mit einem durchsichtigen Kleber wieder zusammengeklebt, sodass  $n_o > n_K > n_e$  erfüllt ist. Aufgrund der unterschiedlichen Einfallswinkel der Strahlen auf die Kristall-Kleber-Grenzfläche kann so bewirkt werden, dass der Einfallswinkel des ordentlichen Strahls größer ist, als der Totalreflexionswinkel. Es

tritt daher nur der außerordentliche Strahl aus, der parallel zur Einfallsebene und somit linear polarisiert ist.

14. Was versteht man unter Spannungsdoppelbrechung?

Unter Spannungsdoppelbrechung versteht man die Eigenschaft von Materialien, unter mechanischer Zugspannung Doppelbrechung aufzuweisen, also in verschiedenen Richtungen verschiedene Brechungsindizes zu besitzen.

15. Wie kann man Licht eines bestimmten Polarisationsstyps erzeugen und nachweisen?

Die Erzeugung linear polarisierten Lichts aus unpolarisiertem geschieht zum Beispiel durch bereits beschriebene Mechanismen der Doppelbrechung. Daraus lässt sich mittels eines  $\lambda/4$ -Plättchens zirkular polarisiertes Licht erzeugen. Der Nachweis dieser Polarisierungen geschieht durch Linearpolarisatoren im ersten Fall bzw. durch die Kombination eines  $\lambda/4$ -Plättchens und eines Linearpolarisators im zweiten Fall.

## 8.2 Durchführung

### 8.2.1 Doppelbrechung

Legen Sie den Kalkspat-Kristall auf Millimeterpapier, auf das Sie zuvor ein farbiges Kreuz gezeichnet haben. Bestimmen Sie nun durch Drehen des Kristalls die Strahlverschiebung  $s$ . Fällt das Licht senkrecht auf die Oberfläche des Kristalls, so kann aus der Strahlverschiebung und der Kristalldicke  $d$  der Ablenkwinkel berechnet werden (siehe Abb. 8.2). Die Formel zur Berechnung des Ablenkwinkels  $\Delta\vartheta$  können Sie der Abb. 8.2 entnehmen. Vergleichen Sie die gemessene Strahlverschiebung  $s$  mit dem theoretischen Wert der Strahlverschiebung des Kalkspats. Die Winkel  $\vartheta_k$  und  $\vartheta_s$  sind wie folgt verknüpft:

$$\frac{\tan \vartheta_s}{\tan \vartheta_k} = \frac{n_o^2}{n_e^2} \quad (8.9)$$

Die optische Achse tritt unter dem Winkel  $\alpha = 45.49^\circ$  aus der Kristalloberfläche aus. Setzen Sie  $\vartheta_s$  aus Gleichung (8.9) in ihre Gleichung für die Strahlverschiebung ein. Mit  $\vartheta_k = 90^\circ - \alpha$  können Sie den theoretischen Wert der Strahlverschiebung berechnen.

### 8.2.2 Gesetz von Malus

Machen Sie sich zunächst mit dem Polarisator vertraut. Überprüfen Sie die Angabe der Durchlassrichtung (E-Vektor). Beobachten Sie die Polarisierungseigenschaften von Gegenständen in ihrer Umgebung sowie der Atmosphäre und der Wolken und notieren Sie diese. Wie schwingt der E-Vektor des beobachteten Lichtes?

Für die Messungen stellen Sie einen Polarisator und einen Analysator mit Winkelmessvorrichtung in den Strahlengang (vgl. Abb. pl.2). Machen Sie sich zunächst klar, wann deren Durchlassrichtungen parallel bzw. senkrecht zueinander stehen. Messen Sie nun die Winkelintensitätsverteilung von polarisiertem Licht, wobei Sie den Winkel zwischen

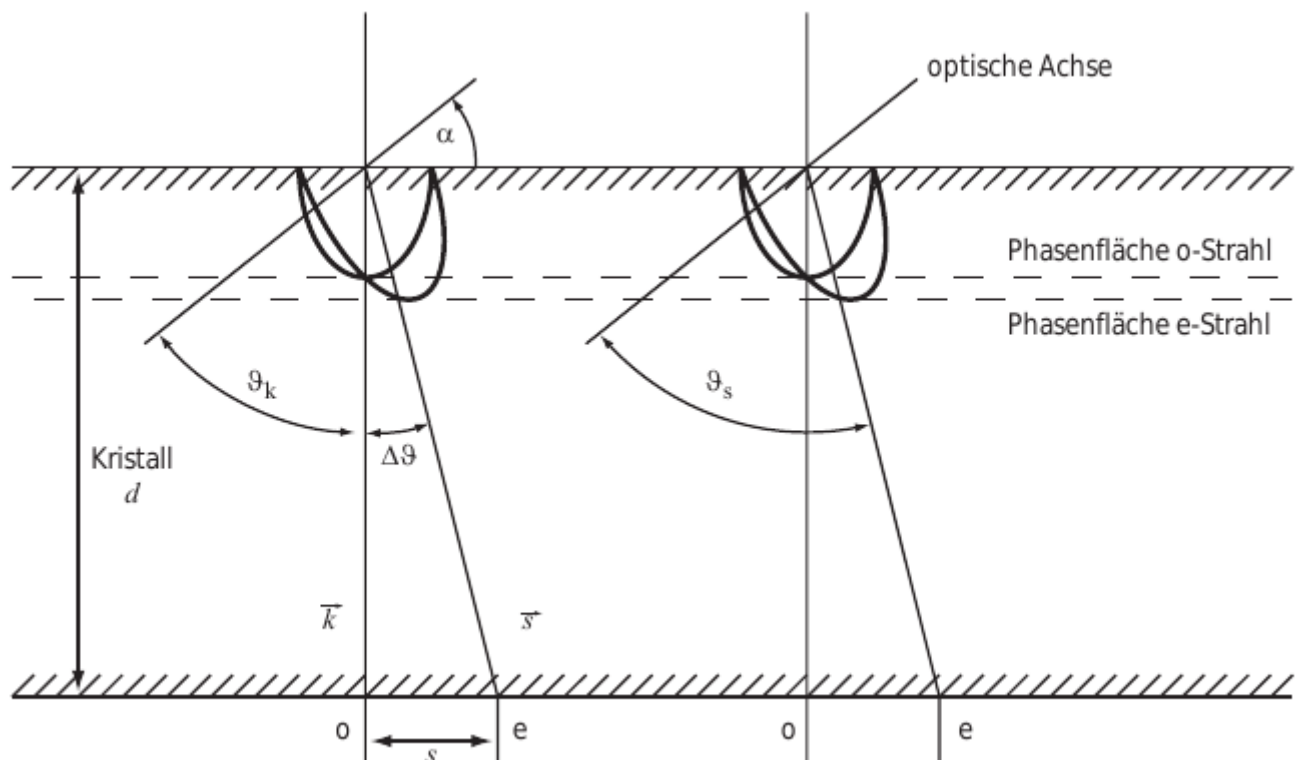


Abbildung 8.2: Ordentlicher und außerordentlicher Strahl im Kalkspat

Polarisator und Analysator kontinuierlich ändern. Überprüfen Sie das Gesetz von Malus durch eine geeignete graphische Darstellung ihrer Messwerte. Tragen Sie dann ihre Messwerte in Polarkoordinatenpapier ein. Was sagt die Graphik aus?

### 8.2.3 $\lambda/4$ –Plättchen

Stellen Sie nun ein  $\lambda/4$ –Plättchen zwischen den Polarisator und den Analysator in den Strahlengang. Orientieren Sie das Plättchen mit Hilfe der Polarisatoren. Erzeugen Sie nun elliptisch polarisiertes Licht. Überlegen Sie sich wie das  $\lambda/4$ –Plättchen eingestellt werden muss! Messen Sie die Intensitätsverteilung wie unter 8.2.2 und tragen Sie ihre Messwerte in Polarkoordinatenpapier ein. Stellen Sie das  $\lambda/4$ –Plättchen nun so in den Strahlengang, dass es zirkular polarisiertes Licht erzeugt. Messen Sie erneut die Intensitätsverteilung wie unter 8.2.2 und tragen Sie ihre Messwerte in Polarkoordinatenpapier ein.

### 8.2.4 $\lambda/2$ –Plättchen

Tauschen Sie das  $\lambda/4$ –Plättchen durch ein  $\lambda/2$ –Plättchen aus und orientieren Sie dieses im Strahlengang. Drehen Sie es anschließend um  $20^\circ$  zur eingestellten Vorzugsrichtung.

Messen Sie die Intensitätsverteilung und tragen Sie Ihre Messwerte in Polarkoordinatenpapier ein. Was schließen Sie aus dem Ergebnis?

### **8.2.5 selbstgebaut...**

Wiederholen Sie die Aufgaben [8.2.3](#) und [8.2.4](#) mit „selbstgebauten“ Plättchen.

### **8.2.6 Beobachtungen**

Betrachten Sie transparente Medien unter gekreuzten Polarisatoren und schreiben Sie Ihre Beobachtungen nieder.

## 9 Optisches Filtern

Der letzte Versuch heißt optisches Filtern. Mithilfe unterschiedlicher Aufbauten werden die Grundideen der Abbe'schen Abbildungstheorie vermittelt.

Der Physiker Ernst Abbe entschlüsselte um 1870 geradezu akribisch die Bildentstehung im Mikroskop. Im Jahr 1867 schlug Ernst Carl Abbe eine Theorie vor, die die Grenzen des Auflösungsvermögens von optischen Systemen und deren Verbindung mit der Wellenlänge verdeutlicht. Durch die dadurch gewonnenen Erkenntnisse gelangen Ernst Abbe bahnbrechende Verbesserungen im Bereich der mikroskopischen Optik. Somit war es möglich Objektive zu berechnen, bei denen die relevanten Abbildungsfehler weitgehend korrigiert sind. Allerdings entstehen beim Bau dieser Objektive zunächst unüberwindliche Schwierigkeiten, da die hierzu notwendigen optischen Gläser zu jener Zeit einfach nicht verfügbar sind. Es ist dann der Glaschemiker Otto Schott, dem es gelingt Gläser mit den benötigten optischen Eigenschaften herzustellen. Die Abbe'sche Abbildungstheorie geht davon aus, dass jedes Objekt Beugungseffekte hervorruft. Somit wird die Bildinformation des Objektes auf die Beugungsmaxima aufgeteilt.

Es können also mehr Informationen aufgenommen werden, wenn mehr Maxima für die Bildgebung genutzt werden. Allerdings ist natürlich die Öffnung eines Objektives nicht unendlich groß, sodass nicht alle Maxima eingefangen werden können. Für eine minimale Strukturinformation müssen mindestens die Maxima der nullten und der ersten Ordnung erfasst werden. Ist die Objektivöffnung zu klein, gelangen die Maxima der ersten Ordnung nicht mehr ins Objektiv und es kann kein Bild entstehen.

### 9.1 Fragen und Aufgaben

- 1. Wie lautet die Abbildungsgleichung für Linsen und was bedeuten die einzelnen Größen?

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f} \text{ falls } d \ll r_1, r_2$$

g= Gegenstandsweite

b= Bildweite

f= Brennweite

- 2. Tragen Sie in die untenstehende Abb. of.1 die entsprechenden Größen der Abbildungsgleichung ein und konstruieren Sie das Bild des Gegenstands G. Vergleichen Sie die konstruierten Werte für Bildgröße und Bildweite mit den berechneten.

Größen in Skizze: f= 3,1 cm , g= 8,5 cm , G= 1,9 cm

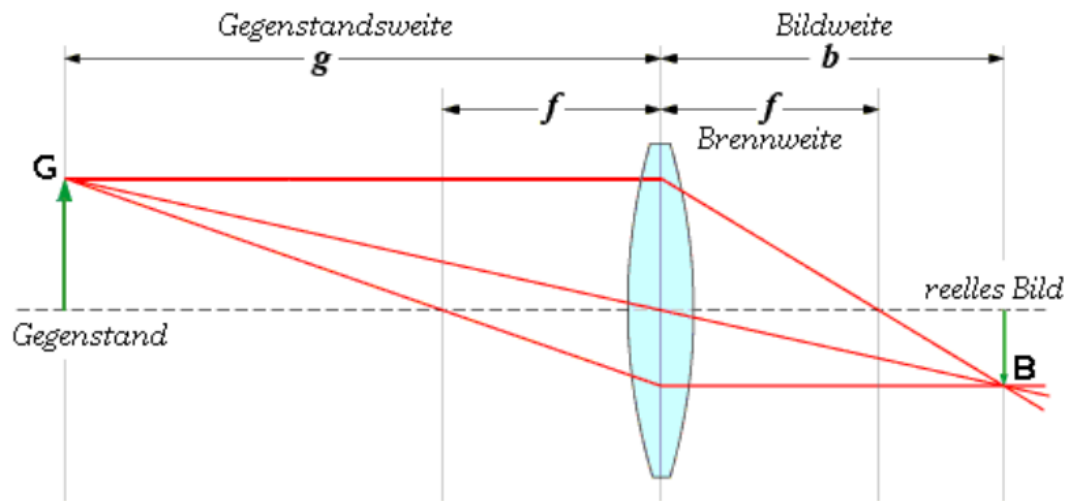


Abbildung 9.1: Konstruktion der Größen der Abbildungsgleichung

gemessene Werte:

$$b = 4,9 \text{ cm}$$

$$B = 1,1 \text{ cm}$$

berechnete Werte:

$$b = \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{g} \right)^{-1} = 4,9 \text{ cm}$$

$$B = \frac{\left( \frac{1}{f} - \frac{1}{g} \right)^{-1} - f}{f} G = 1,1 \text{ cm}$$

- 3. Sie benutzen im Versuch einen Laserstrahl, dessen enges Ausgangsstrahlbündel (näherungsweise) zu einem breiteren Parallelstrahl aufgeweitet wird (siehe Abb. of.2). Dazu sollen zwei Linsen L1 und L2 verwendet werden. L1 habe  $f_1 = 10 \text{ mm}$  und die Aufweitung soll 8-fach sein. Es stehen für L2 Linsen mit 80, 100 und 200mm zur Verfügung. Welche würden Sie wählen? Wie groß müssen die Linsendurchmesser mindestens sein?

$$\text{Vergrößerung} = \frac{f_1}{f_2}$$

$$\Rightarrow f_2 = 8 \cdot 10 \text{ mm} = 80 \text{ mm}$$

Angenommene Eingangsstrahlbreite: 5mm

$\Rightarrow$  Für zweiten Linsendurchmesser  $d_2$  muss gelten:

$$d_2 \geq V \cdot d_1 = 40 \text{ mm}$$

Wenn man davon ausgeht, dass die Eingangsstrahlbreite 5 mm beträgt, wäre es sinnvoll die 80mm-Linse mit mindestens 40mm als  $d_2$  zu benutzen.

- 4. Erläutern Sie die Begriffe „Primäres Bild“ und „Sekundäres Bild“ der Abbeschen Abbildungstheorie. Wo liegen diese Bilder? Wie kann man das primäre Bild mathematisch beschreiben?

primäres Bild: Beugungsbild der Lichtquelle in der Ebene der Brennpunkte

sekundäres Bild: reelles Bild des Objekts in der zum Objekt konjugierten Bildebene.

Mathematische Beschreibung: Das primäre Bild lässt sich mathematisch als Fouriertransformierte des reellen Objekts beschreiben.

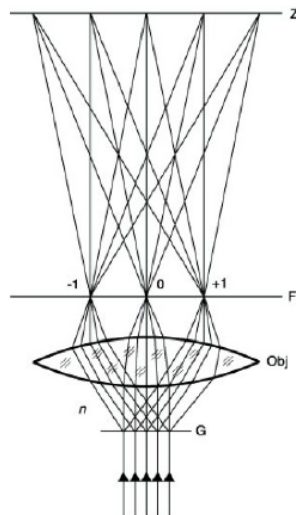


Abbildung 9.2: Konstruktion des primären und sekundären Bildes bei einem Liniengitter; Primärbild bei F, Sekundärbild bei Z

- 5. Das abzubildende Objekt sei nun ein Liniengitter. Das Gitter wird mit kohärentem Licht beleuchtet (siehe Abb. of.3). Die Gitterspalte stehen dabei senkrecht auf der Zeichenebene. Konstruieren Sie primäres sowie sekundäres Bild und skizzieren Sie den Intensitätsverlauf (qualitativ) in den entsprechenden Ebenen (Praktikumsheft!). Berücksichtigen Sie bei der Konstruktion die Beugungsmaxima 0. sowie +/- 1. Ordnung.

Primäres und sekundäres Bild eines Liniengitters

Intensitätsverlauf in Brenn- und Bildebene

- 6. Berechnen Sie den Abstand  $\Delta x$  benachbarter Punkte in der hinteren Brennebene von Aufgabe Nr. 5

Gesucht werden Orte höchster Intensität, also da, wo es zur größten konstruktiven Interferenz kommt.

$$\sin \phi = \frac{\lambda}{d}$$

Aus Kleinwinkelnäherung folgt:  $\sin \phi \approx \tan \phi$



$$\rightarrow \Delta x \approx f \cdot \frac{\lambda}{d}$$

- 7. Um die Auswirkungen von Eingriffen am primären Bild auf das Endbild beobachten zu können, ist es hilfreich, das Endbild (sekundäres Bild) mit dem primären Bild zu vergleichen. Dies geschieht am bequemsten, wenn beide Bilder vergrößert nebeneinander auf dem Beobachtungsschirm dargestellt werden. Die Problemstellung besteht darin, zwei Bilder, die sich an unterschiedlichen Positionen im Strahlengang befinden, in einer Beobachtungsebene (Schirm) abzubilden. Dies erreichen Sie mit untenstehendem Aufbau in Abbildung of.4 (nicht maßstabsgetreu, alle Maße in mm). Beschriften Sie den Aufbau vollständig und berechnen Sie die Brennweiten  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_4$ ,  $f_5$  sowie die Abstände  $a_1, a_2, a_3$  und  $(a_4 + a_5)$ . Berücksichtigen Sie bei der Wahl der Linsen die Liste der zur Verfügung stehenden Komponenten.

Aus Aufgabe 3 wissen wir:  $f_1 = 10 \text{ mm}$  und  $f_2 = 80 \text{ mm}$  ergibt  $a_1 = 90 \text{ mm}$ , da

$$a_1 = f_1 + f_2 = 90 \text{ mm}$$

$$a_2 = f_3 = 200 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{f_4} = \frac{1}{a_3 + 140 \text{ mm}} + \frac{1}{450}$$

$$\rightarrow f_4 = 200 \text{ mm}$$

$$a_3 = 220 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{f_5} = \frac{1}{110 \text{ mm}} + \frac{1}{a_4 + a_5} = \frac{1}{100 \text{ mm}}$$

$$a_4 + a_5 = 1100 \text{ mm}$$

## 9 Optisches Filtern

- 8. Beschreiben Sie den Charakter der Bilder an den Orten P und Q am Leuchtschirm! Am Punkt Q kann man das reelle Bild des jeweiligen Objekts beobachten. Am Punkt P kann man die scharfen Maxima der Interferenz beobachten.
- 9. Überlegen Sie sich, wie Sie eine „optische Bank“ (also einen Aufbau mit mehreren optischen Komponenten wie z.B. Linsen) justieren sollten. Verdeutlichen Sie sich die Bedeutung einer optimalen Ausrichtung der optischen Komponenten auf der optischen Achse anhand Abb. of.5. Setzen Sie den Strahlengang des parallel versetzt einfallenden Stahlbündels fort. Was beobachten Sie ?

Man muss die Linsenzentren möglichst genau auf der optischen Achse halten. Die errechneten Abstände sollten möglichst genau eingehalten werden.

Geschieht dies nicht, läuft das Strahlenbündel immer versetzter zur optischen Achse, wodurch keine Abbildung von sauberen Bildern mehr möglich ist.

### 9.2 Durchführung

Sie sollen nun den in der Vorbereitung geplanten Aufbau schrittweise realisieren. Bauen Sie dazu die optischen Komponenten in der Reihenfolge auf, in der sie vom einfallenden Laserbündel durchlaufen werden. Berücksichtigen Sie außerdem Ihre Überlegungen zur optimalen Justierung einer optischen Bank. Nachdem Sie die Anordnung komplett aufgebaut und justiert haben, sollen Sie die Auswirkungen von Eingriffen (z.B. mit Blenden) im primären Bild am sekundären Bild beobachten. Da das primäre Bild die Fourier-transformierte des Beugungsobjektes darstellt, entspricht das Ausblenden bestimmter Details in der Brennebene der abbildenden Linse der Entfernung von einer bzw. mehreren Komponenten aus dem Fourierspektrum, d.h. bestimmte Raumfrequenzen werden optisch herausgefiltert. Im Versuch wird gezeigt, wie gezielte Eingriffe in das primäre Bild - also in das Beugungsbild - einerseits zu einer Verbesserung der Bildqualität beitragen können, andererseits aber auch dazu führen können, dass zusätzliche, vermeintliche Informationen in das Endbild hineinmanipuliert werden.

1. Bauen Sie die Anordnung gemäß Ihrer Planung bis einschließlich Linse L3 auf. Fügen Sie dann als Objekt ein Kreuzgitter an der dafür vorgesehenen Position

im Strahlengang ein. Suchen Sie mit einem Blatt Papier o.ä. das primäre und sekundäre Bild. Wo befinden sich diese Bilder?

2. Platzieren Sie nun den Umlenkspiegel am Ende der optischen Bank. Den umgelenkten Strahl machen Sie mit Hilfe des Leuchtschirms sichtbar. Nun fügen Sie die Linse L4 möglichst nahe zu L3 ein. Verschieben Sie L4 von L3 weg in Richtung Umlenkspiegel. Was beobachten Sie am Leuchtschirm?
3. Bauen Sie nun auch noch die Linse L5 ein und vervollständigen Sie den Aufbau. Wie gehen Sie dabei am geschicktesten vor? Skizzieren Sie die Intensitätsverläufe in Ihr Heft!
4. Entfernen Sie nun das Kreuzgitter und verwenden Sie einen Doppelspalt als Beugungsobjekt. Fügen Sie in der Fokalebene von L3 eine Irisblende ein und blenden Sie nacheinander höhere Beugungsordnungen (Raumfrequenzen) aus bis nur noch die 0-te Ordnung die Blende passieren kann. Schildern Sie Ihre Beobachtungen. Was folgern Sie daraus für das Auflösungsvermögen optischer Geräte?
5. Wiederholen Sie Aufgabe 4) mit einem Liniengitter als Objekt. Versuchen Sie dann alle ungeraden Beugungsordnungen auszublenden. Verwenden Sie dazu die zur Verfügung stehenden Mikroskop-Objektträger. Geeignete Blenden lassen sich durch schwarze Striche auf den Objektträgern herstellen. Skizzieren und erklären Sie Ihre Beobachtungen.
6. Verwenden Sie jetzt wieder das Kreuzgitter als Beugungsobjekt. Blenden Sie nun mit einer Spaltblende alle horizontalen Beugungsordnungen aus. Was beobachten Sie?
7. Drehen Sie die Spaltblende um die 0-te Beugungsordnung herum. Zeichnen Sie für geeignete Winkel die Intensitätsmuster am Leuchtschirm in ihr Heft und erklären Sie das Zustandekommen dieser Muster
8. Benutzen Sie nun eine Irisblende und finden Sie heraus, welche Beugungsordnungen Sie passieren lassen müssen, um das Kreuzgitter vollständig rekonstruieren zu können.
9. Verwenden Sie als Objekt den auf Dia belichteten Text. Wie sieht das Beugungsbild aus? Versuchen Sie, durch „optische Filterung“ die Bildqualität zu verbessern. Wie erreichen Sie dies und woraus besteht die Verbesserung.
10. Das Objekt sei nun ein Dia, dem eine Punktgitterstruktur überlagert ist. Filtern Sie die Gitterstruktur aus dem Endbild heraus. Wie sieht das Bild des Dias aus, nachdem Sie es von der Gitterstruktur befreit haben?