

# 402 – Brechung, Beugung und Linsengleichung

Bitte lesen Sie zur Vorbereitung auch die Versuchsanweisung zum Versuch 403 „Dünne Linsen und Spiegel“!

Beachten Sie die Angaben zur Lasersicherheit am Ende des Dokuments!

Die Bildentstehung an Sammellinsen können sie hier simulieren:

<https://www.geogebra.org/m/gdgctx5j>

## 1. Aufgaben

- 1.1 Beobachten Sie die Lichtbrechung an einem Optischen Element und bestimmen Sie dessen Brechzahl. Messen Sie dazu die Einfallswinkel- und Brechungswinkel (acht Messwert Paare) und berechnen Sie die Brechzahl.
- 1.2 Bestimmen Sie die Wellenlängen eines Lasers indem Sie die Interferenzmaxima nach Beugung an einem Gitter ausmessen und vergleichen Sie diese mit den Herstellerangaben.
- 1.3 Bestimmen Sie die Brennweite von Sammell- und Zerstreuungslinsen durch Messung der Gegenstands- und Bildweite und vergleichen Sie die erhaltenen Resultate mit den Herstellerangaben!

## 2. Grundlagen

Stichworte:

Spektrum des sichtbaren Lichts, Reflexion, Brechung, Dispersion, Beugung, Interferenz, optische Abbildung, Linsengleichung, Bildkonstruktion, reelle und virtuelle Bilder, Brechkraft, Dioptrie

### 2.1 Eigenschaften von Licht

Licht ist ein Teil des elektromagnetischen Spektrums und ermöglicht uns das Sehen. Das sichtbare Licht liegt zwischen etwa 380 nm (violett) und 780 nm (rot). Je kleiner die Wellenlänge, desto energiereicher ist die Strahlung, so sind elektromagnetische Strahlen mit kürzerer Wellenlänge als dem Spektrum des sichtbaren Lichtes ultraviolette Strahlung, Röntgen- und Gammastrahlung. Längere Wellenlängen als das sichtbare Licht sind Infrarot Strahlung, Mikrowellen, Radiowellen und Niederfrequenzstrahlung.

Im medizinischen Kontext nutzen wir Licht in vielfältiger Weise: von der einfachen Inspektion mit dem bloßen Auge über die Mikroskopie bis hin zu hochmodernen bildgebenden Verfahren und therapeutischen Anwendungen. Die Fähigkeit, die Eigenschaften von Licht zu verstehen, ist daher für von zentraler Bedeutung.

Da sich Wellen nach ähnlichen Gesetzmäßigkeiten ausbreiten, kann man sich die Ausbreitung von Lichtwellen wie die von Wasserwellen vorstellen. Hier gehen ringförmige Wellenfronten von einem Punktemitter aus. Im Bild der Wasserwellen würden diese z.B. durch einen sich auf und ab bewegendem Ball erzeugt. Wenn man sich sehr weit von dem Punktemitter entfernt

(Fernfeld), so verlaufen die Wellenfronten parallel. Solche parallelen Wellenfronten erscheinen als „Lichtstrahl“, dessen Verhalten mit der Strahlenoptik (auch geometrische Optik genannt) erklärbar ist. Dieses Modell betrachtet das Licht als einen Strom von Teilchen, der sich geradlinig im Raum ausbreitet. Beobachtbare Erscheinungen wie Reflexion und Brechung von Lichtstrahlen werden durch Stöße der Lichtteilchen mit den Teilchen des interagierenden Mediums erklärt. Aufgrund geometrischer Überlegungen ist der Verlauf von Lichtstrahlen berechenbar. Die Entstehung vergrößerter und verkleinerter Bilder mit Hilfe von Linsen ist durch optische Konstruktion und der Berechnung von Längenbeziehungen mittels Dreieckssätzen konkret nachvollziehbar.

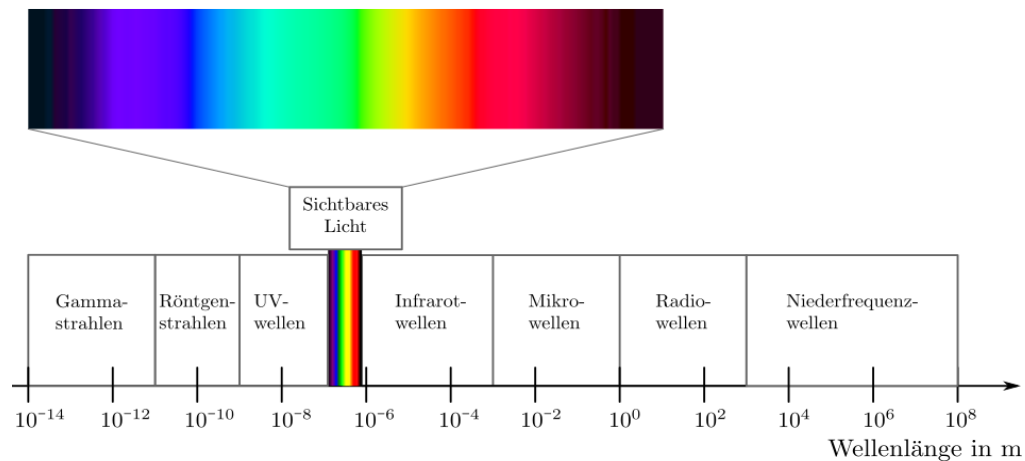


Bild 1: Spektrum des sichtbaren Lichtes und elektromagnetischer Wellen.

Jedoch existieren einige Effekte die im Rahmen der Strahlenoptik ungeklärt bleiben. So kann z.B. bei sichtbarem Licht Beugung an Kanten beobachtet werden. Dies ist für Schallwellen einleuchtend: Spricht man mit jemandem hinter einem Baum, kann derjenige das Gesprochene trotzdem gut hören. Im Fall von Lichtwellen findet man sichtbares Licht in den Schattenräumen hinter einem Hindernis. Das Phänomen Beugung ist eine typische Eigenschaft von Wellen. Im Rahmen der Wellenoptik, die Licht als eine solche sich im Raum ausbreitende Welle betrachtet, können die Lücken der Strahlenoptik geschlossen werden.

Die Welleneigenschaften des sichtbaren Lichts treten dominant zu Tage, wenn die Abmessungen der Gegenstände mit denen das Licht interagiert in der Größenordnung der Wellenlänge liegen. So ist etwa die Auflösung eines Lichtmikroskops beugungsabhängig.

## 2.2 Strahlenoptik

### 2.2.1 Licht an der Grenzfläche zweier Medien – Brechung, Reflexion und Dispersion

Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zweier Medien, sind mehrere Effekte beobachtbar. Man betrachte einen Lichtstrahl, der unter dem Winkel  $\alpha$  zum Lot auf eine Grenzfläche trifft. Ein Teil des auftreffenden Lichts wird an der Grenzfläche entsprechend dem Reflexionsgesetz ( $\alpha = \alpha'$ ) reflektiert. Ein weiterer Teil dringt in das zweite Medium ein, nimmt jedoch einen anderen Verlauf als der einfallende Lichtstrahl. Der Lichtstrahl wird gebrochen (Bild 2).

Die **Lichtbrechung** beruht darauf, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  des Lichtes in verschiedenen Materialien unterschiedlich groß ist. Diese Erscheinung hängt mit der Wechselwirkung mit dem atomaren bzw. molekularen Aufbau der Stoffe zusammen. Sichtbare Folge

der Änderung der Lichtgeschwindigkeit an der Grenzfläche zweier Stoffe ist die Brechung des Lichtes.

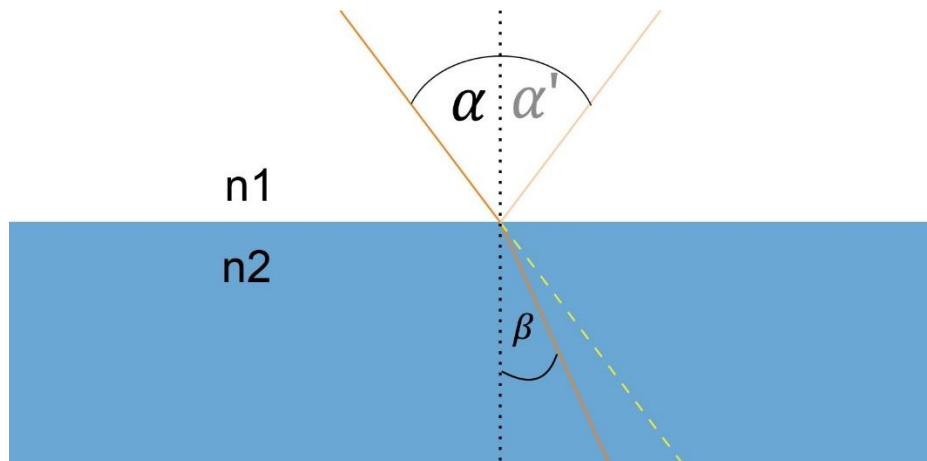


Bild 2: Lichtbrechung am Übergang von einem optisch dünneren ( $n_1$ ) zu einem optisch dichteren Medium ( $n_2$ ). Ein Teil des Lichtes wird an der Grenzfläche reflektiert ( $\alpha'$ ), ein weiterer Teil des Lichtes wird beim Übergang in das optisch dichtere Medium gebrochen. Das Lot steht senkrecht auf der Grenzfläche (Punktlinie) und der im Winkel  $\alpha$  einfallende Lichtstrahl (orange Linie) wird zum Lot hin gebrochen und verläuft im Winkel  $\beta$ .

Der Verlauf der Lichtstrahlen ist abhängig von den Brechzahlen der beiden Medien. Die **Brechzahl  $n$**  ist ein Maß für die optische Dichte eines Materials. Diese dimensionslose Zahl gibt den Faktor an, um den die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit vermindert ist.

Für den Verlauf des gebrochenen Teilstrahls gilt das **Brechungsgesetz**. Für Luft kann in guter Näherung eine Brechzahl von 1,0 angenommen werden

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad (1).$$

Die **Dispersion** hat damit zu tun, dass sich die Brechzahl eines Mediums (z.B. Glas) in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes geringfügig ändert. Damit ist der Brechungswinkel für jede Farbe ein anderer, wodurch es bei weißem Licht im Prisma zu einer Aufspaltung in die einzelnen Spektralfarben kommt. In der Natur geschieht dasselbe beim Regenbogen. Bei der Dispersion sichtbaren Lichtes nimmt die Brechzahl mit zunehmender Wellenlänge ab, d.h. kurzwelliges (violett) Licht wird stärker gebrochen als langwelliges (rot) Licht.

### 2.2.2 Optische Abbildung und Linsen

Linsen dienen der **optischen Abbildung**. Parallel zur optischen Achse einfallendes Licht wird durch eine **Sammellinse** im Brennpunkt  $F$  vereinigt, der Abstand des Brennpunktes  $F$  von der Hauptebene der Linse ist die Brennweite  $f$  (Bild 2a). Anstatt der Brennweite wird in der Augenheilkunde bei Linsen für gewöhnlich die Brechkraft  $D$  in der Einheit Dioptrie ( $dpt = \frac{1}{m}$ ) angegeben. Die Brechkraft ist der Kehrwert der Brennweite

$$D = \frac{1}{f} \quad (2).$$

Parallel zur optischen Achse einfallende Strahlen werden durch eine **Zerstreuungslinse** so gebrochen, als kämen sie von einem (auf der Gegenstandsseite liegenden) Brennpunkt  $f_z$ . Auch hier ist der Abstand des Brennpunktes von der Hauptebene der Linse die Brennweite  $f_z$  (Bild 3b). Für Zerstreuungslinsen ist die Brechkraft eine negative Zahl.

Die **Hauptebene** der Linse ist dabei diejenige gedachte Ebene, an der die Strahlen – unabhängig von den realen Linsenoberflächen – abknicken.

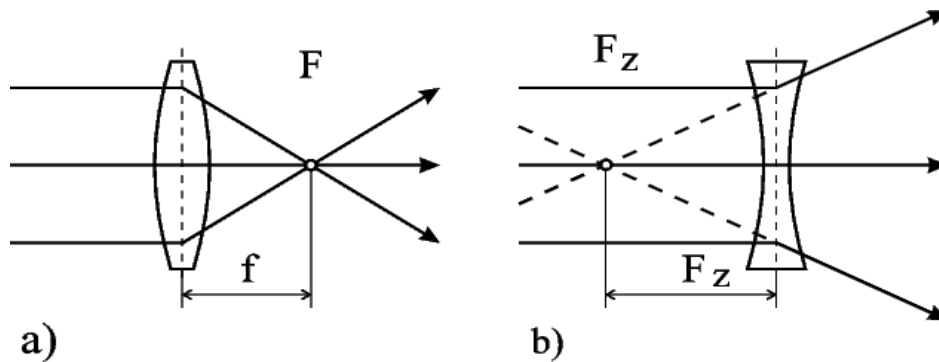


Bild 3: Lichtbrechung an einer Sammellinse (a) und einer Zerstreuungslinse (b), F = Brennpunkt; f = Brennweite; F<sub>Z</sub> = Brennweite Zerstreuungslinse.

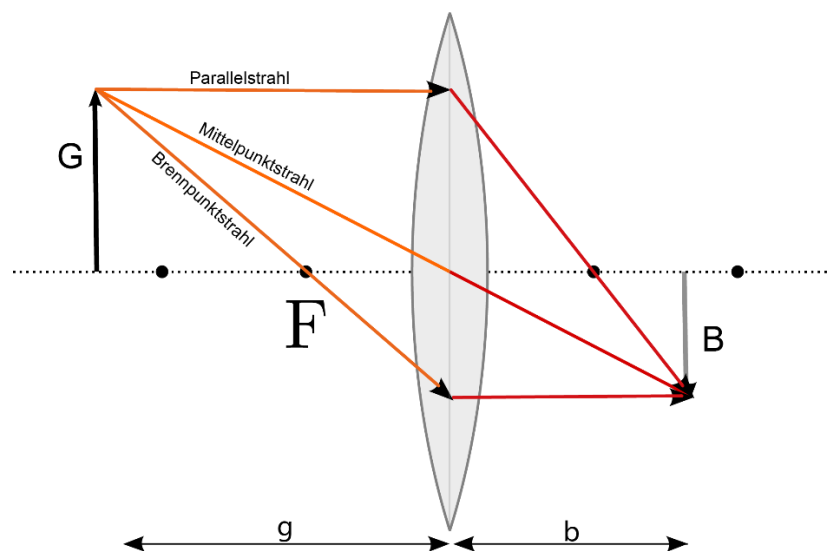


Bild 4: Geometrische Bildkonstruktion eines reellen Bildes bei einer dünnen Sammellinse. Beim hier gewählten Abstand zur Linse entsteht ein verkleinertes Bild. Parallel-, Mittelpunkt- und Brennpunktstrahl können zur Bildkonstruktion verwendet werden. G=Gegenstand; B=Bild; g = Gegenstandsweite, b = Bildweite, F = Brennpunkte vor und hinter der Linse.

Wir betrachten ein reelles Bild auf einem Schirm. Ein **reelles Bild** entsteht an einer Sammellinse, wenn die Gegenstandsweite größer als die Brennweite ist. Es entsteht auf der vom Gegenstand abgewandten Seite der Sammellinse und kann auf einem Projektionsschirm im Abstand  $b$  von der Linse aufgefangen werden. Den Zusammenhang zwischen Gegenstandsweite  $g$ , Bildweite  $b$  und Brennweite  $f$  vermittelt die **Linsengleichung**

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

Steht der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite, kann die Linse als Lupe verwendet werden. Sieht man durch die Linse hindurch auf das Bild (welches sich nun auf der Gegenstandsseite befindet) so spricht man von einem virtuellen Bild. Bei virtuellen Bildern bzw. Brennpunkten nehmen  $b$  bzw.  $f$  negative Werte an.

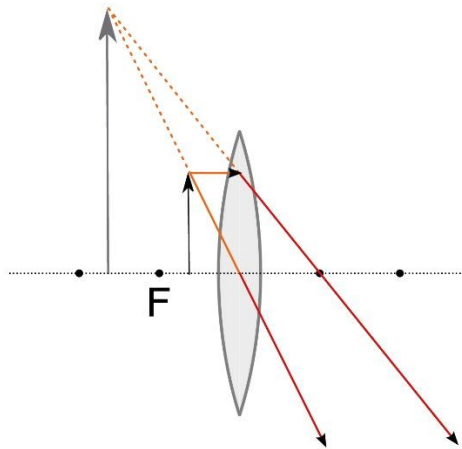


Bild 5: Bildentstehung an der Lupe. Wenn der Gegenstand sich innerhalb der einfachen Brennweite befindet entsteht ein vergrößertes virtuelles Bild (Lupeneffekt).

Optische Systeme bestehen aus mehreren Linsen. Auch das Auge weist mehrere Komponenten auf, die an der Lichtbrechung und Bildentstehung mitwirken (Hornhaut, Linse und Glaskörper). Bei dünnen Linsen die im Vergleich zu den Brennweiten eng zusammenstehen, ergibt sich die Gesamtbrechkraft des Systems einfach aus der Addition der Einzelbrechkräfte.

$$D_{\text{System}} = D_1 + D_2 \quad (4).$$

Entsprechend ergibt sich bei Verwendung der Brennweiten anstelle der Brechkräfte für die Brennweite  $f_{\text{System}}$  des Linsensystems:

$$\frac{1}{f_{\text{System}}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (5).$$

Bei **Zerstreuungslinsen** ist eine direkte Brennweitenmessung nicht möglich, da die Abbildung hier nur virtuelle Bilder liefert. Man setzt deshalb eine Zerstreuungslinse mit einer Sammellinse bekannter Brechkraft zu einem Linsensystem zusammen. Die Brennweite der Zerstreuungslinse ist dann aus der Brennweite des Gesamtsystems bestimmbar. Vorausgesetzt die Brennweite der Sammellinse ist kleiner als der Betrag der Brennweite der Zerstreuungslinse. Anstelle der Brennweiten, kann auch mit den Brechkräften gerechnet werden.

### 2.3. Wellenoptik und Beugung

Einige Eigenschaften von Licht lassen sich mit der geometrischen Strahlenoptik nicht erklären. Dazu gehören Interferenz und Beugung. Alle Wellen sind durch zwei Größen charakterisiert: Ihre Wellenlänge  $\lambda$  sowie deren Schwingungsfrequenz  $f$ . Die Wellenlänge gibt den kleinsten Abstand zwischen zwei Punkten gleicher Phase an, also beispielsweise den Abstand zweier Wellenberge. Alle Wellenlängen im Spektrum des sichtbaren Lichts sind mit einer bestimmten Farbeindruck gekoppelt. Weißes Licht ist eine Überlagerung aus dem gesamten Bereich des sichtbaren Spektrums.

Überlagert man Wellen gleicher Wellenlänge kann man Interferenzen erzeugen. Je nach der Lage der Wellen zueinander können sie sich verstärken oder gegenseitig auslöschen. Verstärken sie sich maximal, so spricht man von konstruktiver Interferenz. Dazu entspricht die Verschiebung der Wellen zueinander einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge. Sind die Wellen um die Weglänge  $\lambda/2$  gegeneinander verschoben kommt es zur Auslöschung der Wellen. Man spricht von destruktiver Interferenz.

### 2.3.1 Beugung am Gitter

Beobachten kann man diesen Effekt, wenn monochromatisches Licht, wie z.B. ein Laser, auf ein geeignetes Gitter gelenkt wird. Nach jedem Einzelspalt des Gitters breitet sich das Licht in Form einer Kugelwelle aus (siehe Bild 6a). Es kommt zur Überlagerung der Einzelwellen. Je nach Ort kommt es jetzt zu einer Verstärkung (Wellenberg trifft auf Wellenberg) oder einer Auslöschung (Wellenberg trifft auf Wellental). Platziert man hinter dem Gitter einen Schirm, sind die Orte konstruktiver Interferenz klar erkennbar. Das intensivste liegt im Zentrum des Interferenzbildes und wird als Maximum 0. Ordnung bezeichnet. Im Abstand  $s_1$  dazu erscheinen die Maxima 1. Ordnung usw.

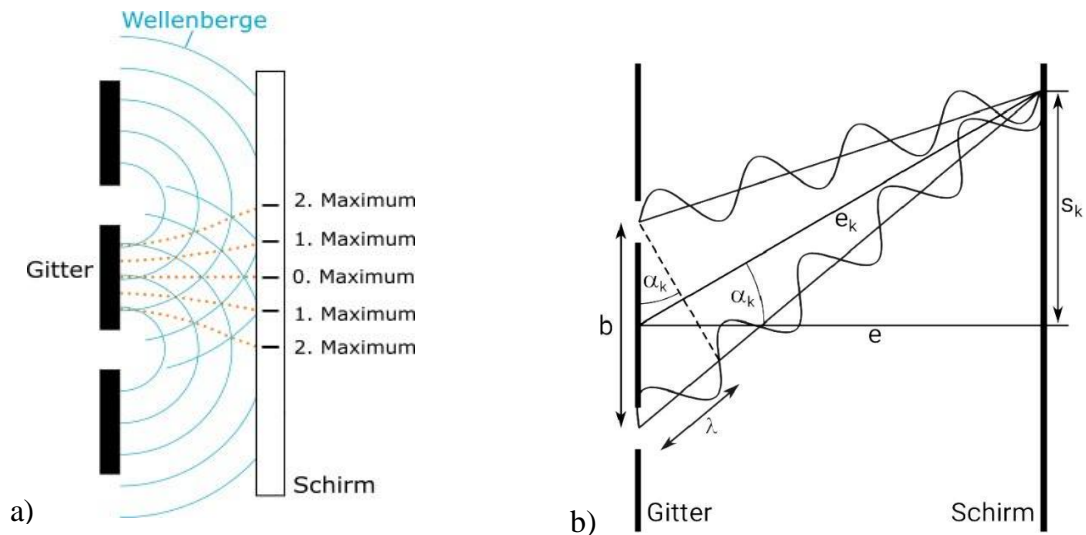


Bild 6: **a)** Beugungsmuster von Lichtwellen nach passieren eines Gitters. **b)** Entstehung der Interferenzmaxima ( $b$  ... Gitterkonstante,  $e$  ... Abstand Gitter und Schirm,  $s_k$ ... Abstand des  $k$ -ten Maximums vom Maximum 0. Ordnung)

Die Lage der Maxima ändert sich mit dem Abstand der Spalte im Gitter ( $b$ ), der Lage des Schirms zum Gitter und der Wellenlänge des verwendeten Lichts. Der Zusammenhang ist mit Hilfe von Bild 6b herleitbar. Eingezeichnet sind 2 Wellenzüge. Auf dem Schirm wird am Auftreffort ein Maximum zu sehen sein, da sich die Wellenzüge um eine ganze Wellenlänge voneinander unterscheiden. Allgemeiner müssen sich die Wellenzüge um ein ganzzahliges Vielfaches voneinander unterscheiden (also  $k \cdot \lambda$ ). Bei genauem Hinsehen erkennt man in der Skizze 2 rechtwinklige Dreiecke, die beide den Winkel  $\alpha_k$  aufweisen. Für den Sinus der Winkel in den jeweiligen Dreiecken gilt:

$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{b} \tag{6}$$

Nutzt man diese Formel zur Bestimmung der Wellenlänge  $\lambda$ , so ergibt sich für die Wellenabhängige Beugung am Gitter:

$$\lambda = \frac{b \cdot \sin \alpha_k}{k} \quad (7).$$

### 3. Versuchsdurchführung

#### 3.1 Brechung

Der Versuchsaufbau besteht aus einer Box in der die Plexiglasplatte mit den Lasern eingefasst ist. Überprüfen Sie zu Beginn des Versuchs, ob diese Platte auf dem Fadenkreuz auf dem Boden der Box gerade ausgerichtet ist, dazu schauen Sie gerade von oben auf den Aufbau. Stellen Sie die Laser genau Senkrecht zum Schirm am hinteren Teil der Box.

Setzen Sie das Lineal in die vorgesehene Halterung, so dass sie Winkelskala sichtbar ist. Nun wird das optische Element (Halbrundzylinder) auf das Fadenkreuz der Messunterlage gestellt, dabei ist senkrecht von oben die Ausrichtung zu kontrollieren. Hier wird das optische Element so eingesetzt, dass die Rundung zum Lineal hin ausgerichtet ist und die flache Seite zum Laser hin. Schalten Sie nun die Laser ein, indem das Netzteil in die Steckdose stecken. Nun wird der untere (grüne) Laser durch den Halbkreiszyylinder geführt, während der obere (rote) Laser über das Plexiglas ausgerichtet ist.

Nun wird das Lineal so ausgerichtet, dass die Laser auf die Mittellinie ( $0^\circ$ ) des Lineals treffen. Wenn das optische Element gerade steht sind beide Laser auf  $0^\circ$  ausgerichtet. Sollten die beiden Laser unterschiedlich ausgerichtet sein, dann wird zunächst die Position des roten Lasers eingestellt, indem das Lineal verschoben wird, dann kann das optische Element durch drehen justiert werden, so dass der grüne Laser auch genau auf die  $0^\circ$  ausgerichtet ist.

Wenn Sie nun den Einfallswinkel durch das Bewegen des Lasers auf der Schiene verändern wird nur der grüne Laser gebrochen, während der rote weiterhin „geradeaus“ über das Plexiglas scheint. Somit kann der rote Laser genutzt werden um den Einfallswinkel ( $\alpha$ ) an der Skala auf dem Schirm einzustellen, unterdessen der Brechwinkel ( $\beta$ ) vom grünen Laser angezeigt wird. Fertigen Sie eine Tabelle für die Messwerte an in der Sie den Einfallswinkel, den Brechwinkel und die errechnete Brechzahl einsetzen. Führen Sie 8 Messungen durch in  $5^\circ$  Schritten. Nach der Messung den Laser ausschalten und das optische Element entnehmen.

Berechnen Sie anschließend die Brechzahl des Plexiglases mit Hilfe des Brechungsgesetzes für alle gemessenen Winkelpaare. Bestimmen Sie den Mittelwert und den Fehler Ihrer Messungen. Die Brechzahl von Luft beträgt näherungsweise 1.

#### 3.2 Beugung am Gitter

Es stehen drei Gitter zur Verfügung mit 100, 300 und 600 Linien/1mm. Diese nur am Rand anfassen!

Es wird wieder das Lineal mit der Winkelskala verwendet. Die ausgeschalteten Laser werden am Fadenkreuz auf  $0^\circ$  ausgerichtet. Nun wird die Halterung für die Gitter in das Fadenkreuz

eingesetzt und anschließend wird das erste Gitter in die Halterung eingesteckt. Danach können die Laser eingeschaltet werden wodurch das Beugungsmuster erscheint.

Jetzt müssen wieder alle Elemente justiert werden, dazu wird zunächst das Lineal in seiner Halterung so verschoben, dass das Beugungsmaximum 0. Ordnung genau in der Mitte (bei  $0^\circ$ ) liegt. Die Beugungsmaxima 0. Ordnung liegen für beide Laser genau übereinander und sollten auch beide genau die Nulllinie treffen.

Probieren Sie alle drei Gitter aus und entscheiden Sie sich für zwei an denen Sie die Messung durchführen. Beachten Sie, dass es sinnvoll ist eine statistische Auswertung der Messungen durchzuführen. Schalten Sie die Laser zum Wechseln der immer Gitter aus!

Für die Messung müssen die Gitter in der Halterung justiert werden. Da die Gitter nicht ganz parallel zum Rahmen ausgerichtet sind bewegen Sie das Gitter so, dass die Linien der Beugungsmuster horizontal ausgerichtet sind. Das Lineal gegebenenfalls noch einmal nachjustieren, damit die 0. Beugungsordnung genau mittig platziert ist. Kontrollieren Sie ob die Beugungsmaxima auf beiden Seiten symmetrisch sind.

Fertigen Sie eine Tabelle an, in der Sie die Beugungsordnung und die Abstände der einzelnen Beugungsmaxima vom Maxima der 0. Ordnung notieren! Messen Sie hier die Abstände für beide Laser. Wiederholen Sie die Messung für das zweite ausgewählte Gitter! Schalten Sie die zum Wechseln der Gitter die Laser aus!

Berechnen Sie nun für jedes gemessene Hauptmaximum die Wellenlänge beider Laser. Ermitteln Sie für jede Kombination aus Gitter und Laser den Mittelwert der Wellenlänge und den Fehler Ihrer Messung! Die Wellenlängen der Laser betragen 532 nm (grün) und 635nm (rot). Wie genau können Sie diese bestimmen? Wie hängen Gitterkonstante und Beugung qualitativ voneinander ab? Und wie ist die Abhängigkeit von Wellenlänge und Beugung?

Rechenhilfe:

$$\begin{aligned}1 \text{ mm} &= 10^{-3} \text{ m} \\1 \text{ nm} &= 10^{-9} \text{ m} \\1 \text{ mm} &= 1\,000\,000 \text{ nm}\end{aligned}$$

Es stehen Gitter mit 100, 300 oder 600 Spalten/mm zur Verfügung. Für die Rechnung benötigt man die Gitterkonstante  $b$ , die angibt wie breit ein Spalt in dem verwendeten Gitter ist, diese ist zuerst zu bestimmen! Beachten Sie, dass die Wellenlänge in nm ( $10^{-9}\text{m}$ ) angegeben wird!

### 3.3 Bestimmung der Brennweiten

Zur Durchführung der Aufgabe 3 steht Ihnen eine optische Bank mit fest angebrachtem Maßstab, beleuchtetem Gegenstand (Pfeil-Blende), Abbildungsschirm sowie Linsenhalterungen zur Verfügung. Die zu vermessenden Linsen werden vom Assistenten ausgegeben. Stellen Sie pro Linse 5 verschiedene Gegenstandsweiten und Bildweiten ein und bestimmen Sie daraus die Brennweite mit Hilfe der Linsengleichung. Berechnen Sie den Mittelwert für Ihre 5 Messwerte und geben sie die Messgenauigkeit an. Wie hängt die Bildgröße vom Abstand des Gegenstandes von der Linse zusammen?

Die Brennweite einer Zerstreuungslinse kann nur aus einer gemeinsamen Messung mit einer Sammellinse bestimmt werden. Messen Sie dazu die Brennweite des Linsensystems und be-

stimmen Sie so die Brennweite der Zerstreuungslinse! Gehen Sie beim Linsensystem genauso vor, wie bereits bei der Sammellinse! Geben Sie hier ebenfalls den Mittelwert und die Messgenauigkeit an! Wie hat sich die Brennweite der Sammellinse durch Hinzufügen der Zerstreuungslinse geändert?

### 3.4 Messungenauigkeit

Die auftretenden Messfehler sind Ablesefehler. Sie sollten also im Laufe Ihrer Messung abschätzen wie genau das Ablesen von den vorhandenen Skalen möglich ist. Bei Aufgabe 2 bietet sich eine Betrachtung der relativen Fehler an. Was sind in Ihrem Fall die Auswirkungen, wenn zur Bestimmung der Wellenlänge ein Gitter mit einer hohen oder niedrigen Gitterkonstante verwendet wird? Was sind die jeweiligen Vor- und Nachteile? Mit welchem Gitter haben Sie genauere Ergebnisse erzielt?

### 3.5. Lasersicherheit

Die in diesem Versuch verwendeten Diodenlaser werden der Laserschutzkategorie 2 zugeordnet. Diese sind unbedenklich, solange der Strahl nicht für längere Zeit auf die Netzhaut trifft. Beim gegebenen Versuchsaufbau ist ein Strahl, der direkt in das Auge trifft unwahrscheinlich, da alles auf der Ebene des Tisches propagiert. Zu Ihrer Sicherheit und der Sicherheit der weiteren Personen im Raum, gibt es daher nur folgende zwei Punkte zu beachten: 1. Experimentieren Sie mit den Augen niemals auf der Ebene der Laser. 2. Schalten Sie die Laser aus, wenn Sie Komponenten (z. B. Beugungsgitter) austauschen, um unerwünschte Reflexionen im Raum zu vermeiden. Sollte wider Erwarten Laserstrahlung das Auge treffen, schützt Sie automatisch der Lidschutzreflex. Dieser sollte nicht unterdrückt werden. Er begrenzt die Exposition auf unter 0,25 s.