

Versuch 8: Brechungsgesetz, Dispersion des Lichts

8.1 Grundlagen

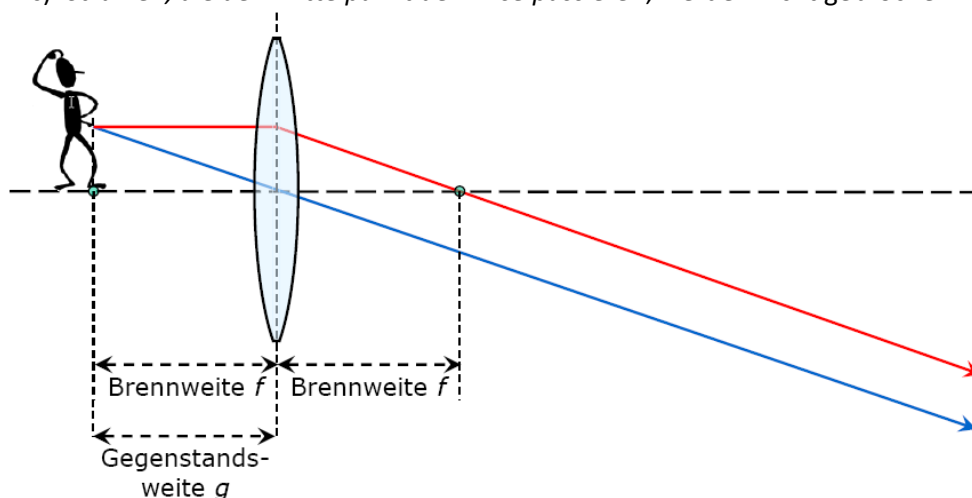
8.1.1 Abbildung durch Linsen

Werden durch ein optisches System die von einem Objektpunkt G ausgehenden Lichtstrahlen wieder in einem Punkt B vereinigt, heißt B *reeller Bildpunkt* von G. Schneiden sich nach Durchlaufen des optischen Systems die *rückwärtigen* Verlängerungen der Lichtstrahlen in einem Punkt B, heißt B *virtueller Bildpunkt* von G. Die Bildpunkte bilden das Bild des Gegenstandes.

Ein wichtiger Unterschied zwischen einem reellen Bild und einem virtuellen Bild ist der, dass das virtuelle Bild nur mit Hilfe weiterer optischer Vorrichtungen (zu denen auch das Auge gehört) beobachtbar ist. Das reelle Bild dagegen ist auch ohne diese zusätzlichen Vorrichtungen beobachtbar.

Zur geometrischen Bildkonstruktion bei der Abbildung durch Linsen (wir betrachten nur symmetrische) werden drei ausgewählte Strahlen benutzt:

- Achsenparallele Strahlen* werden so gebrochen, dass sie durch den Brennpunkt der Linse verlaufen,
- Brennpunktstrahlen* werden so gebrochen, dass sie achsenparallel verlaufen,
- Strahlen, die den Mittelpunkt der Linse passieren*, werden nicht gebrochen.



Diese Konstruktionsregeln gelten sowohl für die virtuelle als auch für die reelle Abbildung, vorausgesetzt, die Linse ist hinreichend dünn (Dicke \ll Durchmesser). Im Übrigen stellen diese drei Strahlen nicht tatsächlich existierende Lichtstrahlen dar; es handelt sich vielmehr um zeichnerische Mittel, die den Zusammenhang von Gegenstand und Bild richtig darstellen.

8.1.1.1 Reelle Abbildung

Eine reelle Abbildung ergibt sich, wenn der Gegenstand außerhalb der Brennweite steht, also für $g > f$. Das Verhältnis Bildgröße zu Objektgröße wird Abbildungsmaßstab A genannt (kann eine Vergrößerung oder eine Verkleinerung sein). Auf Grund geometrischer Beziehungen (Strahlensätze) ergibt sich

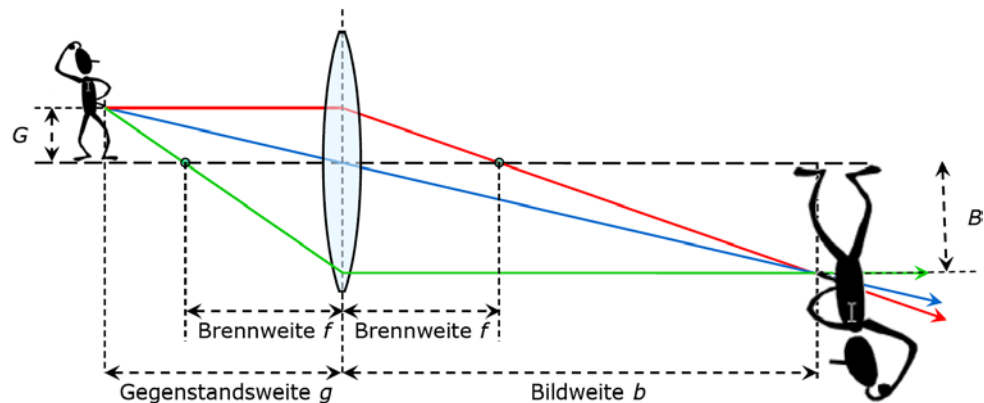
Versuch 8: Brechungsgesetz, Dispersion des Lichts

$$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} = \frac{b-f}{f} \quad (1)$$

Aus dieser Gleichung folgt $b \cdot f = b \cdot g - f \cdot g$ und daraus durch Division mit $(b \cdot g \cdot f)$

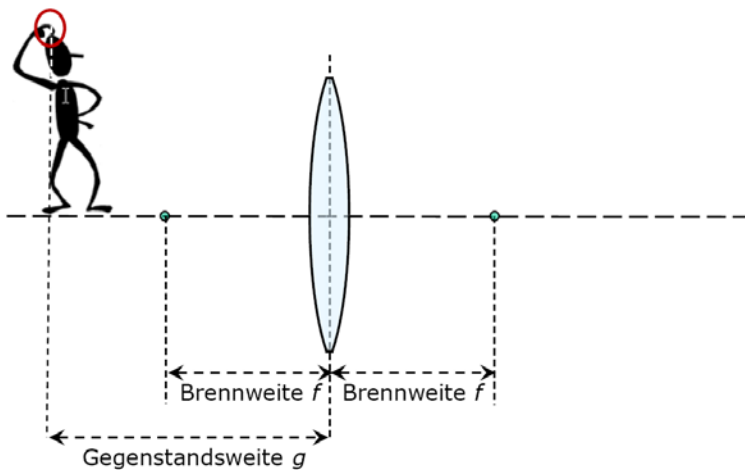
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

Diese Gleichung wird *Abbildungsgleichung* oder *Linsenformel* genannt.



Aufgabe, hier schriftlich bitte beantworten:

1. Zeigen Sie, dass eine reelle Abbildung vergrößert / verkleinert, wenn gilt $f < g < 2f$ / $2f < g$.
2. Konstruieren Sie das Bild für den Fall, dass der Gegenstand größer als die Linse ist, am Beispiel des Scheitels des unten gezeigten Herrn.



Zur Bestimmung der Brennweite von Linsen ist die Linsenformel ungeeignet, weil b und g auf die Linsenmitte ("Hauptebene") bezogen sind; diese ist jedoch – besonders bei Linsen in Fassungen – nicht lokalisierbar. Das *Besselsche Verfahren der Brennweitenbestimmung* geht davon aus, dass es für (hinreichend großen) festen Abstand e zwischen Gegenstand und Bild

$$e = g + b \quad (2)$$

zwei Linsenstellungen gibt, die jeweils ein scharfes Bild liefern. Ist die eine Scharfeinstellung durch die Gegenstandsweite g und die Bildweite b gegeben, dann ergibt sich die zweite Scharfeinstellung durch Vertauschen von Bild- und Gegenstandsweite. Dazu muss die Linse um den Betrag

$$d = b - g \quad (3)$$

verschoben werden. Aus Gln. (2) und (3) folgt:

$$b = \frac{e+d}{2} \quad \text{und} \quad g = \frac{e-d}{2}$$

Einsetzen in die Abbildungsgleichung führt nach einfacher Umformung auf

$$f = \frac{e^2 - d^2}{4 \cdot e}$$

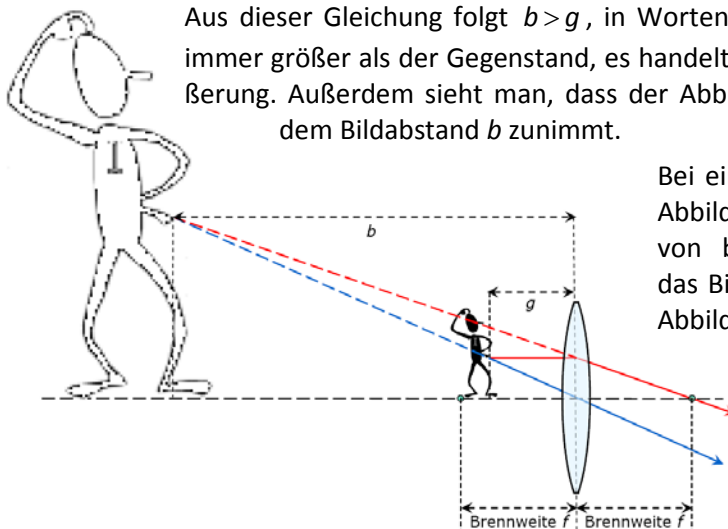
Da g und b auf die nicht genau festlegbare Mittelebene ("Hauptebene") der Linse bezogen sind, lässt sich die Brennweite exakt nur über die Messung von d und e bestimmen.

8.1.1.2 Virtuelle Abbildung

Eine virtuelle Abbildung ergibt sich, wenn der Gegenstand innerhalb der Brennweite steht, also für $g < f$. Man bezeichnet die Linse dann auch als Lupe. Für den Abbildungsmaßstab A folgt wiederum auf Grund geometrischer Beziehungen:

$$A = \frac{B}{G} = \frac{b+f}{f} = \frac{b}{f} + 1 = \frac{b}{g} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{g} - \frac{1}{b} \quad (4)$$

Aus dieser Gleichung folgt $b > g$, in Worten: bei einer Lupe ist das Bild immer größer als der Gegenstand, es handelt sich immer um eine Vergrößerung. Außerdem sieht man, dass der Abbildungsmaßstab A linear mit dem Bildabstand b zunimmt.



Bei einer Lupe ist die Angabe des Abbildungsmaßstabes allerdings von begrenzter Information, da das Bild, im Gegensatz zur reellen Abbildung, nicht 'wirklich' existiert und keine messbaren Ausdehnungen hat (eben virtuell ist). Um den Vergrößerungseffekt bei einer virtuellen Abbildung zu beschreiben, bietet sich

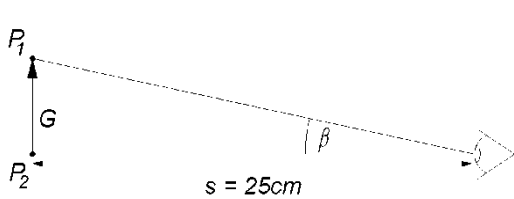
vielmehr die Verwendung der *Schwinkelvergrößerung* V an:

Versuch 8: Brechungsgesetz, Dispersion des Lichts

$$V = \frac{\tan \alpha}{\tan \beta}$$

Dabei ist α der Sehwinkel, unter dem das Bild durch die Lupe gesehen wird; β ist der Sehwinkel, unter dem das Objekt ohne die Lupe gesehen wird. Befindet sich das Auge dicht hinter der Lupe (d.h. zwischen Linse und Brennpunkt), so gilt

$$\tan \alpha = \frac{B}{b}$$



Ohne Verwendung der Lupe würde man das Objekt unter dem Sehwinkel β sehen, und der Tangens dieses Winkels ist das Verhältnis der Objektgröße zum Augenabstand s ,

$$\tan \beta = \frac{G}{s}$$

Damit folgt

$$V = \frac{B}{b} \cdot \frac{s}{G} = \frac{B \cdot s}{G \cdot b} = A \cdot \frac{s}{b} = \left(1 + \frac{b}{f}\right) \cdot \frac{s}{b} = \frac{s}{f} + \frac{s}{b} \quad (5)$$

Demnach nimmt also im Gegensatz zum Abbildungsmaßstab die Sehwinkelvergrößerung mit zunehmender Bildentfernung ab.

Bemerkung zur Größe von s : Der Sehwinkel β ließe sich durch Verringerung des Augenabstandes s vergrößern. Dies hat jedoch seine Grenzen in der begrenzten Anpassungsfähigkeit des Auges; unterhalb eines (individuell verschiedenen) Abstands (dem sogenannten *Nahpunkt*) kann das Auge auch kurzzeitig kein scharfes Bild mehr erzeugen. Als *Bezugssehweite* oder auch *normale* oder *deutliche Sehweite* bezeichnet man den kleinsten Abstand, auf den sich das Auge über längere Zeit einstellen kann, ohne zu ermüden. Auch dieser Abstand ist individuell verschieden; man hat sich daher auf ein 'Norm'-Maß geeinigt und als deutliche Sehweite $s=25$ cm vereinbart. Dieser Wert ist in Gleichung (5) einzusetzen.

8.1.1.3 Linsenmachergleichung, Brechkraft

Wir gehen hier von dünnen Linsen mit der Brechzahl n aus, die zwei konvexe Oberflächen mit Krümmungsradien r_1 und r_2 haben (also im Querschnitt linsenförmig sind). Für die Brennweite gilt

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{bzw.} \quad f = \frac{1}{n-1} \frac{r_1 r_2}{r_2 + r_1}.$$

Diese sogenannte Linsenmachergleichung vereinfacht sich für symmetrische Linsen zu $f = \frac{r}{2(n-1)}$. Je kleiner der Krümmungsradius ist, desto 'kugeliger' ist die

Linse und desto kleiner die Brennweite; je größer der Krümmungsradius, desto flacher die Linse und größer die Brennweite.

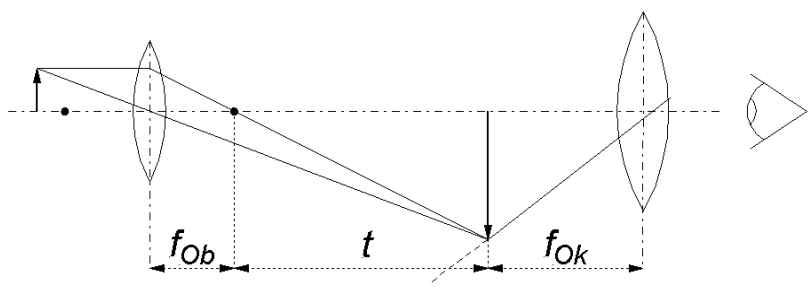
Den Kehrwert der Brennweite nennt man Brechkraft D . Die Einheit der Brechkraft einer Linse ist die Dioptrie (dpt), d.h. $[D]=\text{dpt}$ und es gilt $1 \text{ dpt}=1/\text{m}$. Je kürzer die Brennweite, desto höher die Brechkraft. Beispiel: Eine Linse mit $f=2$ cm hat eine Brechkraft von 50 dpt.

Hintereinander Reihung von Linsen: Befinden sich zwei Linsen direkt hintereinander auf derselben Achse, so ist die Gesamtbrechskraft gleich der Summe der einzelnen Brechkräfte: $D=D_1+D_2$ (bzw. ist die reziproke Gesamtbrennweite gleich

der Summe der reziproken Brennweiten der beiden Linsen). Beispiel: zwei Linsen mit $f_1=2$ cm und $f_2=50$ cm besitzen die Brechkräfte 50 dpt und 2 dpt. Die Gesamtbrechkraft beträgt also 52 dpt und die Gesamtbrennweite damit $f=1,92$ cm (Prinzip der Brille).

8.1.2 Aufbau des Mikroskops

Um eine sehr starke Vergrößerung zu erzielen wäre theoretisch eine Lupe mit einer extrem kleinen Brennweite notwendig, vgl. Gl. (5). Dies ist technisch sehr schwer realisierbar. Man hilft sich mit einer speziellen Anordnung von zwei Linsen; solch ein System nennt man Mikroskop.



Hier wird der zu beobachtende Gegenstand mit einer kurzbrennweitigen Objektivlinse reell abgebildet. Das reelle Zwischenbild wird mit dem als Lupe wirkenden Okular betrachtet. Die Gesamtvergrößerung eines Mikroskops ist gleich dem Produkt der Objektivvergrößerung V_{obj} und der Lupenvergrößerung V_{ok} .

Zweckmäßigerweise beobachtet man das Zwischenbild durch das Okular mit entspanntem (d.h. auf unendlich akkomodiertem) Auge. In diesem Fall entwirft das Objektiv das Zwischenbild in der Brennebene des Okulars. Die Vergrößerung des Objektivs ist dann mit Gleichung (1):

$$V_{obj} = \frac{t}{f_{obj}}$$

In dieser Gleichung ist t der Abstand der einander zugewandten Brennpunkte von Objektiv und Okular. Diesen Abstand bezeichnet man als *optische Tubuslänge* des Mikroskops. Hiervon ist zu unterscheiden die *mechanische Tubuslänge*, dies ist der Abstand zwischen den Mittelebenen des Objektivs und des Okulars.

Die Lupenvergrößerung beträgt nach Gl. (5) für $b=\infty$:

$$V_{ok} = \frac{s}{f_{ok}}$$

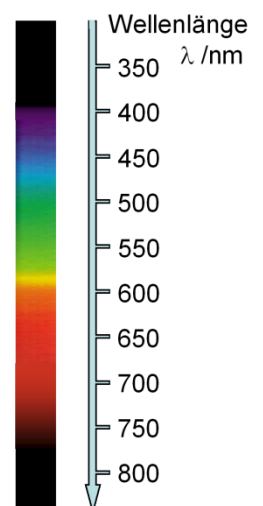
mit s als deutliche Sehweite (25 cm). Damit erhält man:

$$V = \frac{t \cdot s}{f_{obj} \cdot f_{ok}}$$

Die Gesamtvergrößerung des Mikroskops ist also proportional zur Tubuslänge t und umgekehrt proportional zu den Brennweiten f_{obj} und f_{ok} .

8.1.3 Brechzahl und Dispersion

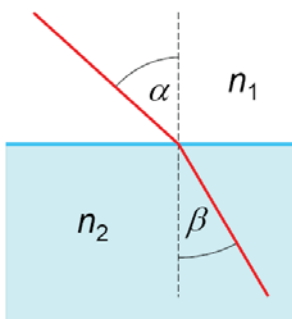
Weißes Licht besteht aus Lichtarten verschiedener Farben. Das Farbenband mit den Hauptfarben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett bezeichnet man als Spektrum. Diese sogenannten reinen Spektralfarben (= monochromatisches Licht) sind nicht weiter zerlegbar. Licht lässt sich als Welle beschreiben, wo-



Versuch 8: Brechungsgesetz, Dispersion des Lichts

bei die Wellen eine elektrische und eine magnetische Feldgröße aufweisen. Dies ist das Modell des Lichts als elektromagnetische Welle. Die Lichtwellen der einzelnen Spektralfarben unterscheiden sich durch ihre Frequenz f und Wellenlänge λ , die mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Wellen hängen über die Gleichung $c = \lambda f$ zusammenhängen.

Neben dem Modell als Welle gibt es auch ein Teilchenmodell des Lichts. Die Photonen genannten Lichtteilchen besitzen eine Energie E , die mit der Frequenz der entsprechenden Lichtwelle über die Beziehung $E = hf$ zusammenhängen; h ist das sogenannte Plancksche Wirkungsquantum. Rot hat die geringste, Violett die höchste Photonenenergie des sichtbaren Lichtes. Obwohl sie sich zu widersprechen scheinen, sind beide Modelle gleichzeitig gültig, was auch durch die Beziehung $E = hf$ deutlich wird, in der mit E und f sowohl Teilchen- wie Welleneigenschaften gleichzeitig vorliegen. Dies bezeichnet man als Komplementarität von Welle und Teilchen.



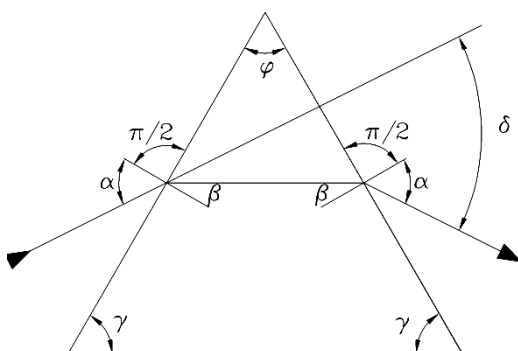
Beim Übergang aus einem durchsichtigen Stoff in einen anderen erfährt ein Lichtstrahl eine Richtungsänderung, die als Brechung bezeichnet wird. Es gilt das Gesetz von Snellius: Bilden der einfallende und der gebrochene Strahl mit dem Einfallslot den Einfallswinkel α bzw. den Ausfallswinkel β , so gilt

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Dabei sind c_1 und c_2 die Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichtes in den beiden Medien. Die Größen n_1 und n_2 sind Stoffeigenschaften und werden als Brechzahlen bezeichnet. Ein Material mit einer höheren / niedrigeren Brechzahl als ein anderes heißt optisch dichter / dünner. Vakuum hat die Brechzahl 1, Luft die Brechzahl $1,003 \approx 1$.

Bei der Brechung bleibt die Energie der Photonen konstant, und damit wegen $E = hf$ auch die Frequenz. Was sich ändert, ist die Wellenlänge λ und damit wegen $c = \lambda f$ die Lichtgeschwindigkeit. Im Allgemeinen ist die Brechung eines Stoffes für die einzelnen Farben des Lichts verschieden, weswegen man immer die Farbe angeben muss, auf die die Brechzahl n bezogen ist (häufig im gelben Bereich).

Durch geeignete optische Bauteile (z.B. ein Prisma) kann weißes Licht in seine Spektralfarben zerlegt werden. Der Grund ist, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lichtwellen (und damit die Brechzahl des Materials) von der Frequenz abhängen. Das bezeichnet man als Dispersion. Bei der normalen Dispersion steigt die Brechzahl mit der Frequenz an, bei der anormalen Dispersion nimmt sie ab.



Durchsetzt ein Lichtstrahl ein Prisma, so wird er um den Ablenkwinkel δ abgelenkt. δ hängt von der Brechzahl des Prismenmaterials für die betreffende Wellenlänge, vom brechenden Winkel φ des Prismas und von der Lage des Prismas in Bezug zum einfallenden Lichtstrahl ab. δ nimmt den kleinsten Wert an, wenn der Strahl symmetrisch durch das Prisma läuft; dies ist in der Abbildung links so angenommen.

Bei symmetrischem Durchgang ergeben sich folgende geometrische Beziehungen:

$$\varphi + 2\gamma = 180^\circ$$

$$\gamma + \beta = 90^\circ$$

Folglich gilt $\varphi = 2\beta$. Ferner ist $\delta = 2(\alpha - \beta)$. Damit folgt insgesamt:

$$\alpha = \frac{\varphi + \delta}{2} \quad \text{und} \quad \beta = \frac{\varphi}{2}$$

Zusammen mit dem allgemeinen Brechungsgesetz $\sin\alpha/\sin\beta = n$ folgt:

$$n = \frac{\sin \frac{\varphi + \delta}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}}$$

Als Beispiel für die Fehlerrechnung notieren wir den Fehler Δn der Brechzahl nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz. Er ist gegeben durch (machen Sie sich die Herleitung der Gleichungen klar)

$$\Delta n = \frac{n}{2} \sqrt{\left(\cot \frac{\bar{\delta} + \bar{\varphi}}{2} - \cot \frac{\bar{\varphi}}{2} \right)^2 \cdot (\Delta\varphi)^2 + \cot^2 \frac{\bar{\delta} + \bar{\varphi}}{2} \cdot (\Delta\delta)^2}$$

wobei wir für $\Delta\varphi$ und $\Delta\delta$ die Ablesefehler der beiden Winkel einsetzen.

Trägt man die Brechzahl in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes auf, so erhält man in der Regel eine monoton fallende Funktion ("normale" Dispersion). Für einige Substanzen kann diese Funktion auch in bestimmten Wellenlängenbereichen mit zunehmender Wellenlänge eine steigende Funktion sein ("anomale" Dispersion).

Als Maß für die Größe der Dispersion dient die Differenz der Brechzahlen für die Spektrallinien H_α (sog. C-Linie; 656,28 nm) und H_β (F-Linie; 486,13 nm) des Wasserstoffatoms; dies ist die "mittlere Dispersion" $dn = n_F - n_C$.

8.1.4 Das Auge

Das Linsenauge ist eines der leistungsfähigsten in der Natur auftretenden Augen. Es findet sich bei Wirbeltieren (einschließlich Mensch) und Kopffüßern (z.B. Tintenfisch). Das Auge ist in die stabile Lederhaut eingehüllt. Der vor der Linse liegende durchsichtige und elastische Teil der Lederhaut heißt Hornhaut (Cornea); seine Brechzahl beträgt $n \approx 1,38$.

Der Lichteinfall in das Auge wird durch die Iris geregelt (die kreisförmige Blende, die den farbigen Teil des Auges bildet). Die Iris besitzt ein Loch (die Pupille), dessen Durchmesser sich etwa zwischen 2 mm und 8 mm ändern kann. Die Pupille wirkt schwarz, da von dort kein Licht und aus dem Augeninneren nur wenig Licht reflektiert wird.

Die Augenlinse ist eine deformierbare bikonvexe Linse, aufgebaut aus mehreren Schichten unterschiedlicher Brechzahl. Der Krümmungsradius dieser Linse kann durch die ringförmigen Ziliarmuskeln geändert werden; z.B. wird bei Kontraktion der Muskeln die Linse kugelig und die Brechkraft steigt. Das Licht gelangt schließlich auf die Netzhaut (Retina), deren Rezeptoren¹ das Licht in elektrische Signale umwandeln, die über den Sehnerv ins Gehirn zur Weiterverarbeitung geleitet werden.

¹ Stäbchen (ca. 125 Millionen) für das Schwarz-Weiß-Sehen in der Dunkelheit und Zapfen (ca. 7 Millionen) für das Farbsehen bei Tageslicht und Dämmerung. Um ein Stäbchen zu erregen, braucht es mindestens 5 Photonen.

Versuch 8: Brechungsgesetz, Dispersion des Lichts

Als Gelber Fleck (Macula lutea) wird der Bereich der menschlichen Netzhaut bezeichnet, der die größte Dichte von Sehzellen aufweist. Er befindet sich in der Mitte der Netzhaut und hat einen Durchmesser von etwa 5 mm. Die äußerste 1,5 mm breite Zone der Macula ist der Bereich der höchsten Stäbchendichte. In der darauf folgenden 0,5 mm breiten Zone sinkt dann der Anteil der Stäbchen stark ab. Das 'schärfste' Sehen (feinste Ortsauflösung) findet in der Fovea centralis statt, einem Bestandteil des gelben Flecks, der ausschließlich Zapfen enthält (Durchmesser etwa 0,5 mm). 'Blinder Fleck' heißt die Stelle, an der der Sehnerv in die Netzhaut mündet.

Das Auge ähnelt in seiner grundlegenden Funktionsweise einer Filmkamera: Blende = Iris, Linse = Augenlinse, Film = Netzhaut. Das Nervensystem analysiert die einfallenden Signale und erzeugt daraus rund 30 Bilder pro Sekunde. Dabei werden durch die Augenbewegung immer andere Bereiche der Umgebung scharf abgetastet, das Gehirn setzt diese einzelnen Informationen zu einem insgesamt scharfen Gesamtbild zusammen. Auch hinsichtlich des Farbsehens trifft die Korrespondenz zur Filmkamera zu. Eine Kamera registriert mit spektral unterschiedlich empfindlichen Sensortypen drei Bilder, deren Helligkeit jeweils die Rot- Grün- und Blauanteile des Farbbilds wiedergeben; dies ist die sogenannte RGB-Norm. Das Auge besitzt ebenfalls drei rot-, grün- und blauempfindliche Zapfentypen auf der Netzhaut, und das Gehirn ‚konstruiert‘ aus diesen drei Farbinformationen das Farbsehen. Weder Kamera noch Auge registrieren demnach die Wellenlängen elektromagnetischer Wellen, sondern zählen Photonen in drei Spektralbändern.

Die folgenden Bemerkungen gelten für ein normalsichtiges Auge. Man spricht vom Ruhezustand des Auges, wenn der Ziliarmuskel völlig entspannt ist. Die Augenlinse ist dann maximal gedehnt, die Krümmungsradien der Kugelflächen maximal, und die Brechkraft der Linse minimal. Lichtstrahlen, die von unendlich weit entfernten Punkten ausgehen, werden auf die Netzhaut abgebildet. Um endlich weit entfernte Gegenstände scharf abzubilden, muss sich die Brechkraft der Augenlinse ändern. Diesen Vorgang nennt man Akkommodation (= Anpassung). Die Kontraktion des Ziliarmuskels bewirkt eine Stauchung der Augenlinse; die Linse wird kugelig und die Brechkraft erhöht sich². Unter Adaption versteht man die Anpassung an äußere Lichtverhältnisse durch Änderung des Pupillendurchmessers.

Fehlsichtigkeiten des Auges können durch Brillen (bzw. Kontaktlinsen) korrigiert werden. Wenn die Brechkraft des Auges zu groß ist, spricht man von Kurzsichtigkeit. Unendlich weit entfernte Gegenstände können in diesem Fall nicht scharf gesehen werden, da ihr Bild vor der Netzhaut liegt. Korrigieren lässt sich das durch eine Brille mit Zerstreuungslinsen. Bei Weitsichtigkeit ist die Brechkraft des Auges ist zu klein, um nahe liegende Gegenstände scharf abzubilden. Der Brennpunkt liegt hinter der Netzhaut. Eine Brille mit Sammellinse kann das ausgleichen. Bei Altersweitsichtigkeit kann die Augenlinse nicht mehr stark genug gekrümmt werden, um auf nahe Gegenstände zu akkomodieren. Und schließlich kann die Brechkraft des Auges in verschiedenen Richtungen (horizontal, vertikal usw.) unterschiedlich sein, was man als Astigmatismus bezeichnet. Die korrigierende Brille

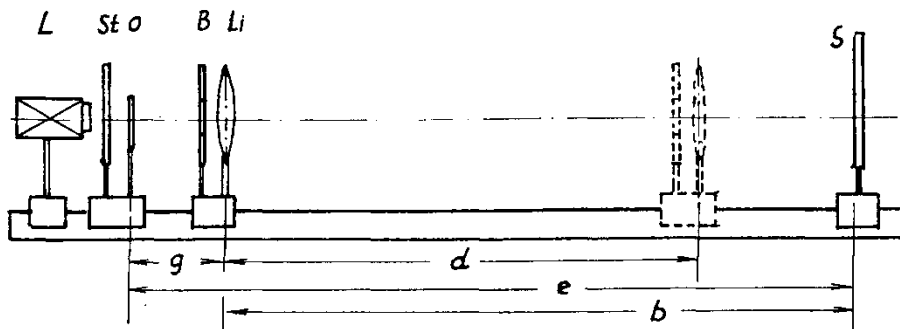
² Den Hauptbeitrag zur Brechung leistet die Grenzfläche zwischen Luft und Hornhaut. Aus diesem Grund kann man unter Wasser ohne Hilfsmittel nicht scharf sehen, da hier der Akkommodationsbereich der Augenlinse überschritten wird.

muss in diesem Fall Linsen haben, die in unterschiedlichen Richtungen unterschiedlich gekrümmt sind.

8.2 Experimentelle Aufgaben

8.2.1 Reelle Abbildung, Bestimmung von Brennweiten

Geräte: siehe Handskizze.



L Lampe	e Entfernung Objekt-Schirm (Bild)
B Kreisblende	g Entfernung Objekt-Linse (Objektstand)
S Schirm	b Entfernung Linse-Bild (Bildabstand)
St Streuscheibe	O Objekt (Dia)
Li Linse	d Strecke zwischen zwei Linsenstellungen, bei denen ein scharfes Bild auf dem Schirm erscheint

8.2.1.1 Versuchsdurchführung:

- Die optischen Bauteile sind auf der optischen Bank bereits in der Höhe justiert. Die Kreisblende B soll zunächst konzentrisch zur Linsenmitte eingestellt werden, so dass nur Zentralstrahlen die Linse passieren können.
- Der Abstand e wird für die Linse möglichst genau vermessen. *Er bleibt für alle folgenden Versuche konstant.*
- Verschieben Sie die Linse zusammen mit der Kreisblende so, dass ein scharfes Bild auf dem Schirm entsteht. Notieren Sie die Stellung der Linse (Maßstab auf der optischen Bank).
- Die Linse wird zusammen mit der Blende zum Schirm hin verschoben, bis wieder ein scharfes Bild auf dem Schirm entsteht. Die Verschiebungsstrecke d muss möglichst genau gemessen werden.

Anmerkung: Das zweite scharfe Bild ist ziemlich klein. Sie müssen also sehr genau arbeiten, um den genauen Abstand zu finden.

- Die Messungen c) und d) werden dreimal wiederholt; für d wird der Mittelwert berechnet.
- Aus den Strecken e und d ist die Brennweite der Linse für Zentralstrahlen zu berechnen.

Versuch 8: Brechungsgesetz, Dispersion des Lichts

Benutzt man bei diesen Messungen nur die Randstrahlen der Linse bzw. bildet man den Gegenstand mit Licht unterschiedlicher Farbe ab, so erhält man unterschiedliche Werte für die Brennweite. Diese sogenannte *sphärische* bzw. *chromatische Aberration* ist ein nicht einfach zu behebender Linsenfehler.

8.2.2 Die Lupe

Geräte: Sammellinse in Fassung, Objekt (Lineal mit mm-Teilung), Schirm mit mm - Raster, optische Bank, Maßstab

Wir verwenden als Lupe eine "halbierte" Sammellinse, die vom Objekt ein vergrößertes Bild entwirft. Oberhalb der Schnittfläche der Linse ist das mm - Raster des Schirms erkennbar (und zwar unvergrößert), so dass die Bildgröße unmittelbar bestimmt werden kann.

- Stellen Sie den Schirm im Abstand $b = 20$ cm von der Linsenmitte auf (Maßstab durch die Linsenfassung führen). Bei dicht hinter der Linse befindlichem Auge wird der Gegenstandsabstand g so eingestellt, dass sowohl das mm-Raster als auch das vergrößerte Bild des Objekts maximal scharf erscheinen. Berechnen Sie für diese Einstellung den Abbildungsmaßstab, hieraus die Brennweite f und die Sehwinkelvergrößerung.
- Wiederholen Sie die Messungen für die Bildabstände 25, 30, 40, ..., 60 cm. Achten Sie darauf, dass g jeweils neu eingestellt werden muss. (Kurzsichtige können nach Ablegen der Brille auch auf kleinere Bildabstände als 20 cm akkomodieren)

Wie groß ist die Brennweite der verwendeten Linse (Mittelwert und Standardfehler) und die jeweilige Sehwinkelvergrößerung?

8.2.3 Aufbau des Mikroskops

Geräte: Mikroskop aus Aufbauteilen der mikrooptischen Bank, Netzgerät

Identifizieren Sie zunächst die wesentlichen einzelnen optischen Komponenten des Modellmikroskops: Beleuchtung, Objektiv, Okular; als Objekt dient eine Mikrometerskala, Teilung 5 mm in 200 Teile. Die Brennweite des Mikroskopobjektivs beträgt 2,75 cm, die des Okulars (Lupe) 5 cm.

- Das Okular (bzw. Okularlinse) wird zunächst aus dem Aufbau entfernt und die Mattscheibe in den Strahlengang gestellt. Variieren Sie den Objektabstand so, dass auf der Mattscheibe ein vierfach vergrößertes Bild des Objekts entsteht (Zwischenbild). Zur Bestimmung der vierfachen Vergrößerung benutze man die Mikrometerskala des Objektes.
- Das Zwischenbild auf der Mattscheibe wird durch die Lupe (Linse mit $f = 5$ cm) betrachtet (Lupe nach Scharfeinstellung feststellen). Bei der Scharfeinstellung der Lupe muss beachtet werden, dass das Auge auf unendliche Entfernung akkomodiert werden muss, d.h. das Zwischenbild und ein weit entfernter Gegenstand müssen gleichzeitig scharf erscheinen. Dies ist nicht ganz einfach zu erreichen. Probieren Sie zunächst ein bisschen herum. Die Mattscheibe wird

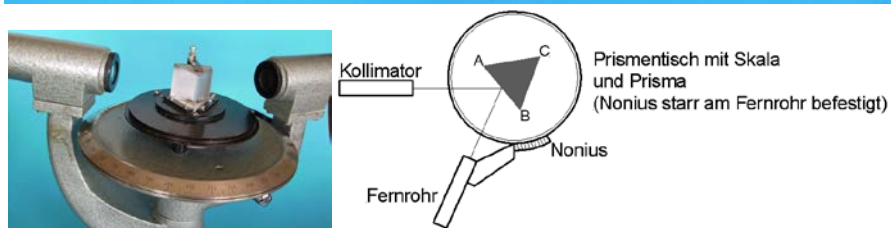
nun seitlich aus dem Strahlengang herausgeklappt (Helligkeit der Lampe reduzieren). Beobachtung? Wie groß ist die mechanische Tubuslänge?

Berechnen Sie aus der Objektivvergrößerung und der Okularvergrößerung die Gesamtvergrößerung des Mikroskops.

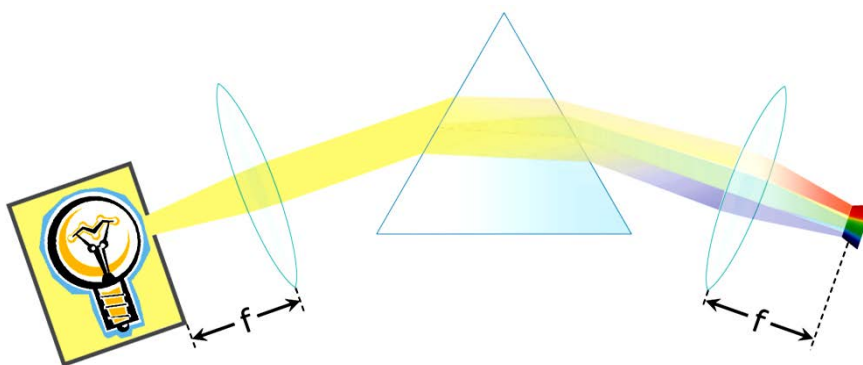
- c) Die Lupe wird durch ein Mikroskopokular ersetzt. Welche Funktion haben die beiden Linsen des Okulars?

8.2.4 Brechzahl und Dispersion

Geräte: Spektrometer-Goniometer, Hg-Spektrallampe mit Netzdrossel, Prisma



Im Experiment genutztes Prismenspektrometer.



Schematischer Aufbau eines Prismenspektrometers, mit Lichtquelle und Spalt, Linse zur Parallelisierung des Lichtbündels, Prisma, und Linse zur spektral zerlegten Abbildung des Spalts in der Bildebene.

Ein Spektrometer-Goniometer ist mit einem Nonius ausgestattet, mit dem Winkel sehr genau bestimmt werden können. Es dient der genauen Bestimmung opti-

Versuch 8: Brechungsgesetz, Dispersion des Lichts

scher Daten von Prismen. In diesem Experiment soll die Brechzahl eines Prismenmaterials in Abhängigkeit von der Wellenlänge aufgenommen werden.

Warnung: Verdrehen Sie nicht alle Einstellknöpfe zugleich und / oder zu stark.

- a) Durch Reflexion des Lichtbündels an den Prismenflächen AB und AC wird der brechende Winkel φ des Prismas gemessen. Messung dreimal wiederholen (unabhängig voneinander), Mittelwert $\bar{\varphi}$ berechnen.
- b) Der Ablenkwinkel δ ist für alle Spektrallinien des verwendeten Hg-Lichts zu messen. Jede Messung dreimal unabhängig voneinander wiederholen, Mittelwert $\bar{\delta}$ berechnen.
- c) Für mehrere Hg-Spektrallinien (mindestens fünf) wird die Brechzahl n der verwendeten Substanz berechnet. In einem Diagramm wird sie gegen die Wellenlänge der betreffenden Spektrallinie aufgetragen. Dem Diagramm werden die Werte n_F und n_C entnommen; hieraus ist die mittlere Dispersion der verwendeten Substanz zu bestimmen. Das Hg-Spektrum (Wellenlängen, Intensitäten) des hier interessierenden Bereiches finden Sie in der Literatur und im Internet, zum Beispiel auf der Seite <http://perso.enstimac.fr/~latailla/java/spectre/>.

8.2.4.1 Versuchsdurchführung:

zu a)

Der Prismentisch wird so eingestellt, dass das aus dem Kollimator kommende Lichtbündel an der *Prismenfläche* AB reflektiert wird. Der Reflex wird mit dem Fernrohr beobachtet; dabei wird das Fernrohr so justiert, dass das Spaltbild genau am senkrechten Strich des Fadenkreuzes anliegt (Bildschärfe durch Herausziehen des Okulars einstellen). In dieser Position wird das Fernrohr durch die obere Rändelschraube am Fuß des Gerätes arretiert. Die Winkeleinstellung des Prismentisches wird am Nonius abgelesen. Anschließend dreht man den Prismentisch so, dass das Licht an der *Prismenfläche* AC reflektiert wird und der Reflex in das arretierte Fernrohr fällt; das Spaltbild muss wieder an der gleichen Stelle des Fadenkreuzes liegen. Der eingestellte Winkel wird abgelesen; die Differenz beider Winkelablesungen ergibt den Drehwinkel. Hieraus lässt sich der brechende Winkel $\varphi = \angle BAC$ zu $\varphi = 180^\circ - \Delta$ berechnen.

zu b)

Prismenentisch und Fernrohr werden so gedreht, dass das Hg-Licht im Prisma gebrochen wird und im Fernrohr beobachtet werden kann (siehe Abb. unten). Zur *Einstellung der minimalen Ablenkung* geht man folgendermaßen vor:

- d) Man beobachtet eine mittlere Spektrallinie im Fernrohr. Bei Drehung des Prismenentisches wandert das Bild der Linie aus. Bei weiterer Drehung in gleicher Richtung kehrt das Spaltbild jedoch wieder um. Genau in diesem "Umkehrpunkt" wird der Prismenentisch arretiert. In dieser Position liegt das Prisma symmetrisch im Strahlengang (Voraussetzung zur Bestimmung der Brechzahl). Bei *fest arretiertem* Prismenentisch können nun nacheinander die Winkel für die einzelnen Spektrallinien vermessen werden; dabei wird das Fernrohr so justiert, dass der senkrechte Strich des Fadenkreuzes an einer Kante des Spaltbildes anliegt. Anschließend nimmt man das Prisma aus dem Strahlengang heraus und beobachtet direkt den beleuchteten Spalt. Der jetzt abzulesende

Winkel führt zur Berechnung des Ablenkungswinkels für jede einzelne Spektrallinie.

8.2.5 Das Augenmodell

Geräte: Augenmodell, Linsen (-0,5 dpt und +1,5 dpt)

Zum *Augenmodell*: Die Länge des Auges kann durch das Verschieben der hinteren Wand vorwärts und rückwärts geändert werden (obere Schraube). Drei Positionen sind durch kleine Kreise gekennzeichnet: das zu kurze Auge (weitsichtig), das normale Auge und das zu lange Auge (kurzsichtig). Die Linse besteht aus durchsichtigem elastischem Material. Ihre Form kann mit Hilfe der mit Wasser gefüllten Spritzen geändert werden (Akkommodation). Die Bilder von verschiedenen entfernten Gegenständen können auf die Netzhaut (weißes Plastik) projiziert werden. Auf der Netzhaut sind der gelbe Fleck (gelber Kreis) und der blinde Fleck (schwarzer Kreis) eingezeichnet. Richten Sie die Anordnung durch Verschieben der hinteren Platte so ein, dass der gelbe Fleck immer in der Mittellinie des Auges liegt.

- Identifizieren Sie zunächst die einzelnen Teile des Modells und vergleichen Sie mit der Abbildung des Auges.
- Wie ändert sich die Form der Linse, wenn Sie Wasser hineindrücken oder herausziehen?
- Stellen Sie die Platte mit dem Buchstaben $1m$ vor dem Augenmodell auf. Ändern Sie die Form der Linse und beobachten Sie, wie sich das Bild auf der Netzhaut verändert.
- Bewegen Sie das Auge näher zum Buchstaben hin ($0,5m$). Wie sieht das Bild jetzt aus? Versuchen Sie, die Linsenform so zu ändern, dass das Bild wieder scharf wird. Müssen Sie dazu Wasser in die Linse drücken oder herausziehen?
- Wiederholen Sie den letzten Schritt für andere Abstände. Wie sieht die Linse aus, wenn das Auge besonders gut nahe / entfernte Gegenstände sehen soll?
- *Nahpunkt*: Machen Sie die Linse so dick wie möglich. Stellen Sie den Abstand zwischen Gegenstand und Auge so ein, dass das Bild auf der Netzhaut scharf wird. Dies ist der kürzeste Abstand, bei dem das Auge ein scharfes Bild erzeugen kann; der Buchstabe steht im Nahpunkt. Wie groß ist dieser Abstand? Versuchen Sie, den Nahpunkt Ihres eigenen Auges zu finden.
- *Kurzsichtigkeit*: Stellen Sie das Augenmodell (normale Länge des Auges) und die Platte mit dem Buchstaben im Abstand von $1 m$ auf. Verändern Sie die Form der Linse, bis die Abbildung scharf dargestellt wird. Wenn Sie nun das Auge verlängern, wird die Abbildung unscharf, da der Brennpunkt nun vor der Netzhaut liegt – das Auge ist also kurzsichtig geworden. Wenn man nicht die Krümmung der Linse verändert, kann das das Bild des Buchstabens auf zwei Möglichkeiten wieder scharf eingestellt werden:
 - a) Der Buchstabe wird näher zum Auge verschoben – messen Sie, wie viel Zentimeter das sind.
 - b) Man korrigiert die Fehlsichtigkeit mit einer Linse, in diesem Fall mit der Zerstreuungslinse mit $-0,5 dpt$.
- *Weitsichtigkeit*: Stellen Sie das Augenmodell (normale Länge des Auges) und die Platte mit dem Buchstaben im Abstand $1 m$ auf. Verändern Sie die Form der Linse, bis die Abbildung scharf dargestellt wird. Wenn Sie nun das Auge

Versuch 8: Brechungsgesetz, Dispersion des Lichts

verkürzen, wird die Abbildung unscharf, da der Brennpunkt nun *hinter* vor der Netzhaut liegt – das Auge ist also weitsichtig geworden. Man kann die Fehlsichtigkeit auch hier mit einer Linse korrigieren, in diesem Fall mit der Sammellinse mit der 1 dpt-Linse. Kann man auch durch Änderung der Entfernung Gegenstand - Auge erreichen, dass das Bild wieder scharf wird?

- e) *Alterssichtigkeit*: Wenn das Auge nicht mehr gut akkomodieren kann, werden nahe Gegenstände nicht mehr scharf abgebildet. Stellen Sie das Augenmodell (normale Länge des Auges) und die Platte mit dem Buchstaben in 1 m Abstand auf. Verändern Sie die Form der Linse, bis die Abbildung scharf dargestellt wird. Nehmen Sie an, dass sich der Buchstabe im Nahpunkt des Auges befindet und dass die Linse nicht mehr akkomodieren kann. Wenn Sie nun den Buchstaben näher an das Auge verschieben, ohne die Form des Objektivs zu ändern, ist das Bild immer unscharf. Diese Fehlsichtigkeit kann mit der Sammellinse behoben werden. Wo liegt der neue Nahpunkt?