

Name 1:	Matrikelnr.:
Name 2:	Matrikelnr.:

Datum:	Antestat:
Datum:	Abtestat:
Gruppennr.:	Punkte:

## Versuch B3: Geometrische Optik / Auge

### 1. Kurzbeschreibung

In diesem Versuch werden die Grundlagen geometrischer Optik, wie Brechung, Reflexion und Abbildung durch dünne Linsen sowie die Korrektur von Fehlsichtigkeiten am Modell eines menschlichen Auges erarbeitet.

#### 1.1 Biologischer Kontext

Grundkenntnisse der geometrischen Optik werden in der Praxis beim Einsatz verschiedener Geräte zur Analyse, wie z. B. Mikroskopie, benötigt. Nicht zuletzt sind sie Voraussetzung dafür, Aufbau und Funktionsweise des (menschlichen) Auges zu verstehen.

Das menschliche Auge ist in der Lage, elektromagnetische Strahlung in einem Wellenlängenbereich von etwa 380 nm bis 780 nm zu verarbeiten. Diese Strahlung wird daher als sichtbares Licht bezeichnet. Das Licht gelangt durch die Hornhaut und die Augenlinse auf die Netzhaut. Dort wird der Lichtreiz von lichtempfindlichen Rezeptoren, den Stäbchen und Zapfen, durch einen photochemischen Prozess in einer neuronalen Erregung umgewandelt, die über den Sehnerv in Teile des zentralen Nervensystems weitergeleitet und dort verarbeitet werden.

Der erste Teil dieses komplexen Bildverarbeitungsprozesses im Auge und im zentralen Nervensystem ist die Erzeugung eines Bildes auf der Netzhaut. Die daran beteiligten Strukturen des Auges sind in Abb. 1 schematisch dargestellt. Die zum Verständnis der Bildentstehung notwendigen physikalischen Grundlagen sollen Sie in diesem Versuch erarbeiten. Einen detaillierteren Aufbau und die Funktionsweise des Auges finden Sie in *Meschede: Gerthsen Physik. 22. Aufl., Seite 499 f.* sowie in *Tipler: Physik. 3. Aufl., Seite 1089 – 1093.*

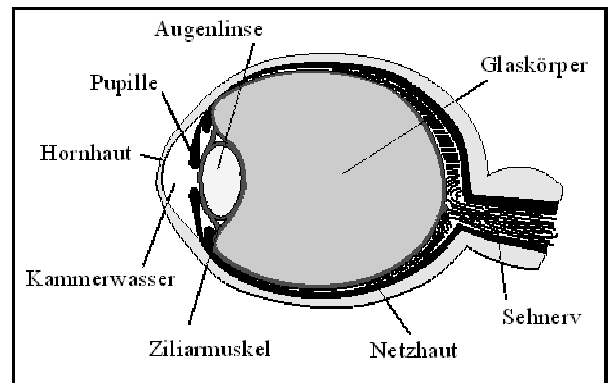


Abb. 1: Schnitt durch das menschliche Auge

Die zum Verständnis der Bildentstehung notwendigen physikalischen Grundlagen sollen Sie in diesem Versuch erarbeiten. Einen detaillierteren Aufbau und die Funktionsweise des Auges finden Sie in *Meschede: Gerthsen Physik. 22. Aufl., Seite 499 f.* sowie in *Tipler: Physik. 3. Aufl., Seite 1089 – 1093.*

#### 1.2 Physikalischer Kontext

Da die Augenlinse eine wichtige Rolle bei der Erzeugung von Bildern auf der Netzhaut spielt, sollen Sie sich im ersten Versuchsteil zunächst nur mit der Erzeugung des Bildes eines Gegenstandes durch eine Linse beschäftigen. Danach lernen Sie die Brennweite als eine wichtige Kenngröße einer Linse und ein Verfahren zu deren Abschätzung kennen. Sie untersuchen den Zusammenhang zwischen der Brennweite einer Linse und der Wölbung der Linsenflächen.

Im zweiten Versuchsteil experimentieren Sie mit einem Augenmodell, in dem sich (wie im menschlichen Auge) eine akkommodationsfähige Linse befindet. Sie untersuchen das Prinzip der Akkommodation sowie die Auswirkungen verschiedener Fehlsichtigkeiten und deren Korrekturmöglichkeiten durch geeignete Brillen.

#### 1.3 Physikalische Grundbegriffe

Reelle Bilder, Gegenstandsgröße, Bildgröße, Gegenstandsweite, Bildweite, (gegenstands- bzw. bildseitige) Brennweite von Linsen, Akkommodation, Nahpunkt und Fernpunkt des Auges, Brechung, Brechungsindex, Snelliussches Brechungsgesetz, Brennpunkt, Abbildungsgleichung, Abbildungsmaßstab, Brechkraft, Akkommodationsbreite, Fehlsichtigkeiten: Myopie, Hyperopie, Presbyopie, Zerstreuungslinse, Sammellinse

## 2. Komponenten für den Versuchsaufbau:

- 2 Lichtquellen, zusammengesetzt aus 5 Leuchtdioden
- 3 Linsen
- 1 Schirm
- 1 optische Bank
- Verschiedene Reiter als Halter für Lichtquelle, Linse und Schirm
- 1 Maßstab
- 1 Augenmodell mit Bildschirm
- 6 Brillengläser verschiedener Stärke

## 3. Durchführung des Versuches

Die nachfolgende Anleitung zur Durchführung des Versuches hat vier wesentliche Komponenten.

- A Fragen und Aufgabenstellungen sind am Anfang mit einem A gekennzeichnet.
- F Formeln und Regeln werden vorne mit einem F gekennzeichnet und durchnummeriert.
- *Kursiv geschriebene Zeilen markiert mit einem Punkt dienen als Anleitung bzw. Hilfestellung zur Versuchsdurchführung.*
- H *Kursiv geschriebene Zeilen, die zusätzlich mit H gekennzeichnet sind, enthalten darüber hinaus kleinschrittige Erklärungen, die in einzelnen Fällen hilfreich sein können.*

### 3.1 Vorbereitung

- *Machen Sie sich mit den einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus (2.) vertraut und kontrollieren Sie, dass alle Teile vorhanden sind.*

### 3.2 Eigenschaften von Linsen: Abbildung durch Linsen

Eine wichtige Eigenschaft von Linsen ist, dass man damit Bilder von Gegenständen erzeugen kann. So erzeugt z. B. die Augenlinse ein Bild des betrachteten Gegenstands auf der Netzhaut. Solche Bilder, die auf der Netzhaut, einem Schirm oder auf dem Film bzw. Sensor in einem Fotoapparat entstehen, nennt man reelle Bilder.

- *Versuchen Sie, mit einer Linse das Fenster des Praktikumsraumes oder Personen, die sich darin bewegen, auf einem hellen Untergrund (z. B. der Wand, einem Blatt Papier...) abzubilden.*

**Achtung: Schauen Sie niemals durch die Linse direkt in die Sonne!**

- A Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen!

.....  
.....

Um die Erzeugung von Bildern genauer zu untersuchen, stehen Ihnen am Arbeitsplatz die folgenden Hilfsmittel zur Verfügung:

- Eine Lichtquelle (rot), die sich aus 5 Leuchtdioden zusammensetzt,
- ein Schirm,
- eine optische Bank mit verschiedenen Reitern als Halter für Lichtquelle, Linse und Schirm,
- ein Maßstab.

Die Lichtquelle soll zunächst mit Linse 1 auf den Schirm abgebildet werden.

- Schrauben Sie Gegenstand (Lichtquelle), Linse und Schirm in den Reitern fest. Sie können nun auf der optischen Bank verschoben werden.
- Versuchen Sie durch Verschieben von Linse und Schirm das Bild des Gegenstands auf dem Schirm scharf zu stellen.

Den Abstand vom Gegenstand zur Mitte der Linse, der sich dann ergibt, nennt man Gegenstandsweite  $g$  und den Abstand von der Linsenmitte zum Schirm (also zum Bild) Bildweite  $b$ .

H Solange das Bild nicht die maximal erreichbare Schärfe hat, ist es nicht sinnvoll, von Bildweite oder -größe zu sprechen. Stellen Sie also vor dem Ablesen dieser Größen ein möglichst scharfes Bild ein. Beachten Sie dabei, dass jedes Verschieben eines Bauteils Einfluss auf die Bildschärfe hat.

A Hat dieses Bild die gleichen Eigenschaften wie die Bilder, die Sie vorher erzeugt haben?

.....

.....

A Verändern Sie jetzt die Gegenstandsweite  $g$  und stellen Sie wieder scharf. Wie haben sich das Bild und die Bildweite  $b$  verändert?

.....

.....

**Diese Veränderungen sollen Sie nun systematisch untersuchen:**

- Messen Sie mit dem Maßstab die Größe  $G$  des Gegenstands und tragen Sie das Ergebnis in die Tabelle ein.
- Bilden Sie den Gegenstand für mindestens 4 verschiedene Gegenstandsweiten scharf auf den Schirm ab. **Achten Sie dabei darauf, dass Sie sowohl verkleinerte als auch vergrößerte Bilder erhalten.**
- Messen Sie zu jeder Gegenstandsweite  $g$  die zugehörige Bildweite  $b$  sowie die Größe  $B$  des Bildes und tragen Sie diese in die Tabelle ein.

$G = \dots\dots\dots \text{ cm}$										
Linse 1					Linse 2			Linse 3		
$g/\text{cm}$	$b/\text{cm}$	$B/\text{cm}$	$B_{\text{ber}}/\text{cm}$	$\Delta B_{\text{ber}}/\text{cm}$	$g/\text{cm}$	$b/\text{cm}$	$B/\text{cm}$	$g/\text{cm}$	$b/\text{cm}$	$B/\text{cm}$

- Wiederholen Sie den Versuchsteil für die anderen beiden Linsen.

A Wie verändern sich Bildweite  $b$  und Bildgröße  $B$ , wenn Sie die Gegenstandsweite vergrößern? Ist das bei allen drei Linsen gleich? Und was geschieht bei einer Verkleinerung der Gegenstandsweite?

.....

.....

.....



- A Bilden Sie die drei Ableitungen  $\frac{\partial B}{\partial G}$ ,  $\frac{\partial B}{\partial b}$  und  $\frac{\partial B}{\partial g}$  und schreiben Sie die Formel zur Berechnung der Unsicherheit  $\Delta B_{ber}$  auf.

$$\frac{\partial B}{\partial G} = \dots \qquad \frac{\partial B}{\partial b} = \dots \qquad \frac{\partial B}{\partial g} = \dots$$

$$\Delta B_{ber} = \dots$$

Detailliertere Ausführungen zu Begriffen der Fehlerrechnung sowie zur Fehlerfortpflanzung finden Sie in Kapitel 4.4.

### 3.3 Eigenschaften von Linsen: Brennweite

- A Untersuchen Sie mit Linse 1, **ob** und **wie** sich die Bildweite verändert, wenn Sie sehr große Gegenstandsweiten einstellen, also den Gegenstand auch über das Ende der optischen Bank hinaus von der Linse entfernen.

.....  
 .....

Die Bildweite verändert sich kaum noch, wenn Sie bei großen Gegenstandsweiten den Gegenstand noch weiter von der Linse entfernen. Die Bildweite hat eine untere Grenze, die für die jeweilige Linse charakteristisch ist und als deren Brennweite  $f$  bezeichnet wird. (Genau genommen ist das die Brennweite in Luft. Vgl. Kapitel 3) Für einen „unendlich weit“ entfernten Gegenstand und damit eine „unendlich“ große Gegenstandsweite würden Sie exakt diese Brennweite als Bildweite messen.

- H Sie sollen hier die Brennweiten Ihrer Linsen nicht exakt messen, sondern nur abschätzen, indem Sie einen möglichst weit entfernten Gegenstand auf einen hellen Untergrund (Wand, Schirm, Papier) abbilden. Wenn sich die Bildweite bei weiterer Vergrößerung der Gegenstandsweite nicht mehr merklich ändert, ist diese Bildweite eine gute Näherung für die Brennweite  $f$ . Ideal wäre z. B. die Sonne. **Hier reicht es für eine grobe Abschätzung aus, wenn Sie ein Fenster auf die gegenüberliegende Wand im Praktikumsraum abbilden.**

- A Bestimmen Sie die Brennweite der 3 Linsen:
- Linse 1:  $f = \dots$  cm
- Linse 2:  $f = \dots$  cm
- Linse 3:  $f = \dots$  cm

- A Können Sie diese Brennweiten mit den Gegenstands- und Bildweiten, bei denen Bild und Gegenstand jeweils gleich groß sind, in Zusammenhang bringen?

.....  
 .....

Es besteht außerdem ein Zusammenhang zwischen der Brennweite einer Linse und der Wölbung der Linsenfläche, der sehr wichtig für das Verständnis der Akkommodation beim Auge ist. Um diesen herauszufinden, müssen Sie die Linsen von der Seite oder im Querschnitt betrachten.

- A Welcher qualitative Zusammenhang besteht zwischen der Brennweite und der Wölbung der Linsenfläche?

.....  
 .....

### 3.4 Untersuchen Sie das Prinzip der Akkommodation.

Sie haben die Bilder bisher scharf gestellt, indem Sie den Schirm oder die Linse verschoben haben, also durch Änderung der Bildweite. Im menschlichen Auge ist die Bildweite jedoch durch den Abstand zwischen Netzhaut und Augenlinse fest vorgegeben. Deshalb sollen Sie jetzt, in Anlehnung an das menschliche Auge, mit einer vorgegebenen festen Bildweite arbeiten. Dieser Wert orientiert sich an den Brennweiten der 3 Linsen und der Länge der optischen Bank. Er steht in keinem Zusammenhang mit den Verhältnissen beim Auge.

- Versuchen Sie, bei der **festen Bildweite** von  $b = 32 \text{ cm}$  für **verschiedene Gegenstandsweiten  $g$** , eine scharfe Abbildung auf dem Schirm zu erzeugen, indem Sie verschiedene Linsen verwenden.

A Für wie viele Gegenstandsweiten ist das mit jeder der Linsen möglich? Notieren Sie die gemessenen Gegenstandsweiten.

.....  
.....

A Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Gegenstandsweite und der Brennweite bzw. der Wölbung der Linse, die (bei dieser Gegenstandsweite) für eine scharfe Abbildung benötigt wird.

.....  
.....

Das Auge arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip. Die Augenlinse wird natürlich nicht ausgetauscht, kann aber ihre Brennweite verändern. Zu jeder Gegenstandsweite stellt sich unwillkürlich die geeignete Wölbung und damit die Brennweite der Augenlinse so ein, dass auf der Netzhaut ein scharfes Bild entsteht (vgl. Kapitel 5.1).

### 3.5 Realisierung der Akkommodation bei der Augenlinse

Ein Augenlinsenmodell, das im Praktikumsraum zur Verfügung steht, zeigt, wie die Akkommodation, d. h. die kontinuierliche Variation der Wölbung und damit der Brennweite, bei der Augenlinse anatomisch realisiert ist. An diesem Modell sollen Sie die in diesem Versuchsteil Aufgaben bearbeiten. **Bitte wenden Sie sich vorher an Ihren Betreuer / Ihre Betreuerin.** Sollte das Modell gerade nicht zur Verfügung stehen, beginnen Sie **zunächst** mit dem Versuchsteil 3.6 und holen Sie diesen Versuchsteil **möglichst bald** nach.

Das Augenlinsenmodell zeigt die für den Akkommodationsmechanismus wesentlichen anatomischen Strukturen des Auges. Dem Ziliarmuskel entspricht hier die Spiralfeder mit durchzogener Kordel, die an einem Gummiring (elastische Aderhaut) befestigt ist (Abb. 1). Die Linse, hier aus einem elastischen Kunststoff, ist durch Bänder und Klammern (Zonulafasern) mit der Spiralfeder verbunden. Durch Zug an der Kordel kann der „Ziliarmuskel“ angespannt werden. Hinter der Linse befindet sich – in festem Abstand – ein Schirm, der die Netzhaut des Auges darstellt und vor der Linse ein Gegenstand, der auf dieser Netzhaut abgebildet werden soll.

A Was geschieht mit der Linse bei Anspannung und Entspannung des Ziliarmuskels? Ist sie angespannt oder entspannt? Wie verändern sich Wölbung und Brennweite?

.....  
.....  
.....

H Den Zusammenhang zwischen Brennweite und Wölbung haben Sie an den Glaslinsen untersucht. Sie können ihn qualitativ auf die Kunststofflinse wie auch auf die Augenlinse übertragen.

A In welchem Zustand müssen sich Ziliarmuskel und Linse befinden, um das Bild bei einer großen Gegenstandsweite scharf abzubilden?

H Scharfstellen können Sie ausschließlich durch Anspannung bzw. Entspannung des Ziliarmuskels.

.....  
.....

A Wie hängen Anspannung von Muskel und Linse von der Gegenstandsweite ab und wie verändern sich dabei die Wölbung und Brennweite der Linse?

.....  
.....  
.....

A Wird die Gegenstandsweite verringert, bis keine scharfe Abbildung mehr möglich ist, befindet sich der Gegenstand am sogenannten Nahpunkt. Dieser Zustand wird als Nachakkommodation bezeichnet. Beschreiben Sie den Zustand von Ziliarmuskel und Linse in diesem Punkt.

.....  
.....  
.....

A Warum ist bei kleineren Gegenstandsweiten keine scharfe Abbildung mehr möglich?

.....  
.....  
.....

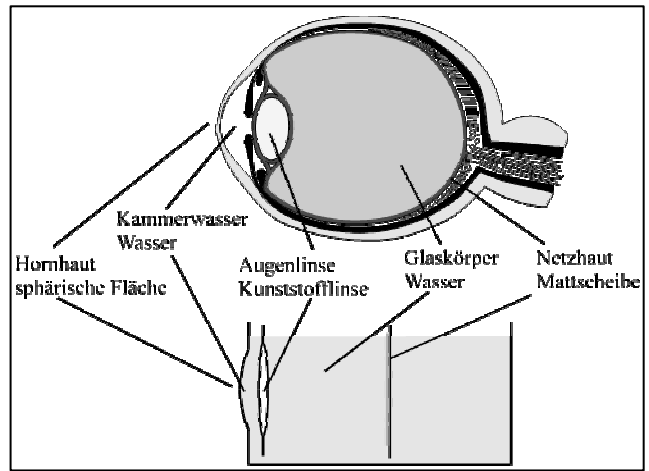
H Wird die Akkommodationsfähigkeit durch die Linse oder den Muskel begrenzt

### 3.6 Untersuchen Sie die Abbildung und die Auswirkungen von Fehlsichtigkeiten am Augenmodell.

In diesem Versuchsteil können Sie am Augenmodell die Prinzipien der Abbildung im menschlichen Auge und die Auswirkungen von Fehlsichtigkeit untersuchen.

Abb. 2 zeigt die für die Abbildung wichtigen Teile des menschlichen Auges und darunter die entsprechenden Komponenten des im Versuch verwendeten Augenmodells. Die akkommodationsfähige Augenlinse wird in diesem Modell durch eine Linse realisiert, die aus zwei Folien besteht, zwischen die Silikonöl gefüllt wird. Über die Füllmenge können Sie die Wölbung der Linsenfläche und damit die Brennweite der Linse variieren. Diese Variation geschieht, wie im Auge und beim Augenlinsenmodell, kontinuierlich an einer Linse. Die Füllmengenvariation hat jedoch keine anatomische Entsprechung. Der tatsächliche Akkommodationsmechanismus, der auf der Variation der Linsenspannung beruht, kann am Augenlinsenmodell beobachtet werden. Er ist am Augenmodell aus technischen Gründen nicht realisierbar. In beiden Fällen wird jedoch eine Variation der Wölbung der Linsenflächen und dadurch eine Änderung der Brennweite erreicht.

- Füllen Sie die PVC-Wanne bis über die sphärische Fläche mit demineralisiertem Wasser und stellen Sie sie **gerade** vor die optische Bank.
- Achten Sie darauf, dass die Linse möglichst dicht hinter der sphärischen Fläche hängt.
- Für die Mattscheibe gibt es 3 mögliche Positionen, die am Wannenrand markiert sind durch: N für das normalsichtige (emmetrope) und das alterssichtige (presbyope), K für das kurzsichtige (myope) und W für das weitsichtige (hyperope) Auge. Der Halter muss so eingehängt werden, dass die Skala zur sphärischen Fläche hinzeigt.



**Abb. 2: Analogie zwischen menschlichem Auge und Augenmodell**

### 3.7 Messungen am normalsichtigen Auge

Als normalsichtig oder emmetrop bezeichnet man ein Auge dann, wenn es im nicht akkommodierten Zustand (minimale Füllmenge der Linse) in sehr großen Entfernungen scharf sieht.

- Hängen Sie die Mattscheibe an der mit N gekennzeichneten Position ein.
- Stellen Sie jetzt den Gegenstand an das Ende der optischen Bank (ca. 140 cm von der Wanne entfernt) und versuchen Sie, durch Füllen der Linse ein scharfes Bild auf der Mattscheibe zu erhalten.

H Durch die leichte Trübung der Linse beispielsweise durch Staubpartikel wird das von der Lichtquelle ausgehende Licht zum Teil gestreut. Versuchen Sie trotzdem, eine möglichst scharfe Abbildung zu erzeugen und die Bildgrößen abzulesen.

- Bringen Sie den Gegenstand in 20cm-Schritten näher an das Augenmodell und stellen Sie immer wieder scharf. Notieren Sie dabei jeweils die Gegenstandsweite  $g$ , die Bildgröße  $B$  und die zugehörige Füllmenge  $V$ .

A Tragen Sie die gemessenen Werte in die Tabelle ein.

<b><math>g/cm</math></b>	<b>140</b>	<b>120</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>60</b>	<b>40</b>
<b><math>B/cm</math></b>						
<b><math>V/ml</math></b>						

A Welchen Zusammenhang zwischen Gegenstandsweite, Linsenwölbung und Bildgröße stellen Sie fest? Was müsste mit der Linse geschehen, um weiter als 140 cm entfernte Gegenstände scharf abbilden zu können?

.....

.....

.....

Durch die maximale Füllmenge (hier ca. 80 ml) ist der **Nahpunkt des Auges** festgelegt. Das ist der Punkt, an dem das maximal akkommodierte Auge scharf sieht. Gegenstände, die sich näher am Auge befinden, können nicht mehr scharf gesehen werden.

A Bestimmen Sie für das emmetrope Auge die Gegenstandsweite und die Bildgröße am Nahpunkt.

$g_{\text{emmetrop}} = \dots\dots\dots \text{ cm}$

$B_{\text{emmetrop}} = \dots\dots\dots \text{ cm}$



A Bestimmen Sie die Nahpunkte Ihrer Augen.

H Sie können die Nahpunkte Ihrer eigenen Augen ungefähr bestimmen, indem Sie einen Gegenstand mit einem Auge fixieren und ihn so nah an das Auge bringen, dass Sie ihn gerade noch scharf sehen. Lassen Sie dann Ihren Partner mit einem Maßstab ungefähr die Entfernung des Gegenstands von Ihrem Auge messen (vorsichtig). Brillenträger sollten den Versuch mit und ohne Brille durchführen und die Ergebnisse vergleichen.

Nahpunkt rechtes Auge:  $g = \dots\dots\dots$  cm (ohne Brille)  $g = \dots\dots\dots$  cm (mit Brille)

Nahpunkt linkes Auge:  $g = \dots\dots\dots$  cm (ohne Brille)  $g = \dots\dots\dots$  cm (mit Brille)

### 3.8 Messungen am alterssichtigen Auge

Im Alter lässt die Akkommodationsfähigkeit des Auges nach, weil die Linse durch Elastizitätsverlust nicht mehr so stark gewölbt werden kann (vgl. Kapitel 3). Im Modell wird die Alterssichtigkeit dadurch simuliert, dass für diesen Versuch die maximale Füllmenge auf **60 ml** begrenzt wird.

A Bestimmen Sie für das presbyope Auge die Gegenstandsweite und die Bildgröße am Nahpunkt.

$g_{\text{presbyop}} = \dots\dots\dots$  cm  $B_{\text{presbyop}} = \dots\dots\dots$  cm

A Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem für das emmetrope Auge und überlegen Sie, welche Veränderungen bei Presbyopie für das Sehen in der Ferne auftreten.

.....  
.....

A Sollte der Presbyope seine Brille nur für die Nähe oder auch für die Ferne tragen? Begründen Sie Ihre Entscheidung.

.....  
.....  
.....

- Ermitteln Sie jetzt das Brillenglas, mit dem diese Fehlsichtigkeit optimal korrigiert wird.

H Das bedeutet, dass das presbyope Auge trotz begrenzter Füllmenge **den gleichen Nahpunkt hat, wie das emmetrope Auge**. Dazu finden Sie am Versuchsplatz 6 Brillengläser. Es handelt sich dabei um Sammellinsen und Zerstreuungslinsen, deren Stärken in Dioptrien angegeben sind. Hierbei haben Sammellinsen positive Werte, Zerstreuungslinsen negative Werte (vgl. Kapitel 3). Sie können zur Korrektur der Fehlsichtigkeit in den Reiter eingesetzt werden, der auf der optischen Bank direkt vor dem Augenmodell in Höhe der Hornhaut platziert wird.

$D_{\text{presbyop}} = \dots\dots\dots$  dpt

### 3.9 Messungen am kurzsichtigen Auge

Das kurzsichtige oder myope Auge ist im Vergleich zum normalsichtigen Auge zu lang. Die zugehörige Markierung für die Mattscheibe befindet sich deshalb weiter hinten. Die Linse hat keinen Elastizitätsverlust, die Füllmenge ist also nicht begrenzt.

- Hängen Sie die Mattscheibe an der mit  $K$  gekennzeichneten Position ein.

- Stellen Sie jetzt den Gegenstand an das Ende der optischen Bank (ca. 140 cm von der Wanne entfernt) und versuchen Sie, durch Füllen der Linse ein scharfes Bild auf der Mattscheibe zu erhalten.
- Notieren Sie die Bildgröße  $B$  und die zugehörige Füllmenge  $V$ .
- Wiederholen Sie die Messung für Gegenstandsweiten von 90 cm und 40 cm.

$g/\text{cm}$	140	90	40
$B/\text{cm}$			
$V/\text{ml}$			

- Ermitteln Sie ebenfalls die Gegenstandsweite und die Bildgröße am Nahpunkt sowie das Korrekturglas, mit dem das myope Auge etwa den gleichen Nahpunkt hat, wie das emmetrope Auge.

$$g_{\text{myop}} = \dots\dots\dots \text{ cm}$$

$$B_{\text{myop}} = \dots\dots\dots \text{ cm}$$

$$D_{\text{myop}} = \dots\dots\dots \text{ dpt}$$

- A Vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen für das emmetrope Auge, speziell im Hinblick auf den Nahpunkt und auf die Füllmenge der Linse bei maximaler Entfernung des Gegenstands (hier 140 cm) und überlegen Sie, welche Probleme für den Myopen für das Betrachten weit entfernter Gegenstände auftreten.

.....  
 .....

- A Was bewirkt in diesem Fall das Brillenglas?

.....  
 .....

H Die Füllmenge der Linse im Modell repräsentiert die Anspannung des Ziliarmuskels!

### 3.10 Messungen am weitsichtigen Auge

Das weitsichtige (hyperope) Auge ist im Vergleich zum normalsichtigen zu kurz. Die Mattscheibe muss deshalb weiter vorne eingehängt werden. Wiederum entfällt die Begrenzung der Füllmenge.

- Hängen Sie die Mattscheibe an der mit  $W$  gekennzeichneten Position ein.
- Stellen Sie jetzt den Gegenstand an das Ende der optischen Bank (ca. 140 cm von der Wanne entfernt) und versuchen Sie, durch Füllen der Linse ein scharfes Bild auf der Mattscheibe zu erhalten.
- Notieren Sie die Bildgröße  $B$  und die zugehörige Füllmenge  $V$ .
- Wiederholen Sie die Messung für Gegenstandsweiten von 90 cm und 40 cm.

$g/\text{cm}$	140	90	40
$B/\text{cm}$			
$V/\text{ml}$			

- *Ermitteln Sie ebenfalls die Gegenstandsweite und die Bildgröße am Nahpunkt sowie das Korrekturglas, mit dem das hyperope Auge etwa den gleichen Nahpunkt hat, wie das emmetrope Auge.*

$$g_{\text{hyperop}} = \dots\dots\dots \text{ cm}$$

$$B_{\text{hyperop}} = \dots\dots\dots \text{ cm}$$

$$D_{\text{hyperop}} = \dots\dots\dots \text{ dpt}$$

- A Vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen für das emmetrope Auge, speziell im Hinblick auf den Nahpunkt und auf die Füllmenge der Linse bei maximaler Entfernung des Gegenstands (hier 140 cm).

.....

.....

.....

- A Warum wird bei Hyperopie empfohlen, die Brille auch für die Ferne zu tragen?

.....

.....

.....

- H *Probieren Sie aus, welchen Einfluss das vorher ermittelte Brillenglas bei großen Entfernungen des Gegenstands auf die Abbildung hat.*

**3.11 Untersuchen Sie die Dispersion am Augenmodell.**

- *Hängen Sie die Mattscheibe wieder in die mit N gekennzeichnete Position ein.*
- *Schrauben Sie zunächst den Gegenstand mit den roten LEDs in den Reiter und positionieren Sie ihn etwa 90 cm vor dem Augenmodell.*
- *Variieren Sie die Füllmenge, bis Sie ein scharfes Bild des Gegenstands auf der Mattscheibe sehen, und notieren Sie die Füllmenge.*
- *Wiederholen Sie den Versuch mit dem blauen Gegenstand und notieren Sie wiederum die Füllmenge.*

$$V_{\text{rot}} = \dots\dots\dots \text{ ml}$$

$$V_{\text{blau}} = \dots\dots\dots \text{ ml}$$

- A Welchen Einfluss hat das eben gezeigte Phänomen auf die Wahrnehmung?

.....

.....

.....

- H *An Ihrem Versuchsplatz finden Sie eine Karte mit zwei verschieden eingefärbten Bildern.*

## 4. Physikalische Grundlagen

### 4.1 Brechung

Die Abbildung von Gegenständen durch Linsen ist nur deshalb möglich, weil das Licht, das vom Gegenstand ausgeht, beim Durchgang durch die Linse abgelenkt, d. h. gebrochen wird. Trifft ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche zwischen zwei transparenten Medien (z. B. Luft-Glas oder Glas-Wasser), so wird er teilweise reflektiert und dringt teilweise in das andere Medium ein. Dabei ändert sich im Allgemeinen seine Ausbreitungsgeschwindigkeit und dadurch auch seine Ausbreitungsrichtung (Abb. 3).

Die für die Brechung wichtigen Eigenschaften der beiden Medien werden durch deren Brechungsindizes  $n_1$  und  $n_2$  angegeben. Der **Brechungsindex** eines Mediums ist das Verhältnis zwischen der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (ca.  $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ) und der Lichtgeschwindigkeit im Medium.

Als Quotient zweier Geschwindigkeiten besitzt der Brechungsindex keine Einheit, sein Zahlenwert ist in der Regel größer als 1. Die Brechungsindizes einiger im Versuch vorkommender Medien sind:

$$n_{\text{Luft}} = 1,0003 \approx 1 \qquad n_{\text{Wasser}} \approx 1,33$$

$$n_{\text{Glas}} \approx 1,5 \text{ (abhängig von der Glassorte)} \qquad n_{\text{Silikonöl}} \approx 1,5$$

Die Ausbreitungsrichtung der Lichtstrahlen wird durch den Einfallswinkel  $\alpha_1$ , bzw. den Brechungswinkel  $\alpha_2$  zwischen dem Lichtstrahl und dem Flächenlot angegeben (vgl. Abb. 3), das Flächenlot steht senkrecht auf der Grenzfläche.

Man beobachtet die folgenden Phänomene: Wird beim Durchgang durch die Grenzfläche der Brechungsindex größer ( $n_2 > n_1$ ), so wird der Winkel zum Lot kleiner ( $\beta < \alpha$ ). Man sagt, der Lichtstrahl wird **zum Lot hin gebrochen**. Umgekehrt wird im Fall, dass  $n_2 < n_1$  gilt, der Lichtstrahl **vom Lot weg gebrochen**.

Quantitativ kann man diese Änderung mit Hilfe des **Snelliusschen Brechungsgesetzes** beschreiben:

$$F(3) \quad n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

$n_1$ : Brechungsindex Medium 1  
 $n_2$ : Brechungsindex Medium 2  
 $\alpha$ : Einfallswinkel  
 $\beta$ : Brechungswinkel

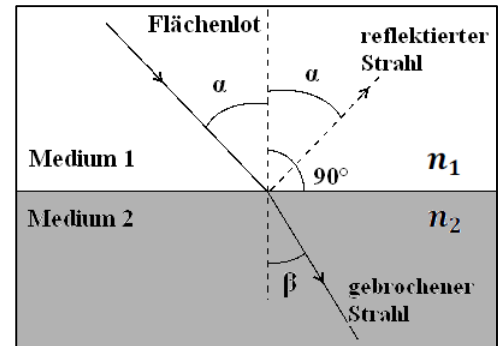


Abb. 3: Brechungsgesetz

Erklären lassen sich Reflexion sowie Brechung mit Hilfe des Huygensschen Prinzips. Dies besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront wiederum als Ausgangspunkt für eine sekundäre, kugelförmige Elementarwelle verstanden werden kann. Diese Elementarwellen besitzen die gleichen Eigenschaften wie die Welle selbst, so ändert sich beispielsweise die Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht. Die Elementarwellen aller Punkte überlagern sich und die sogenannte Einhüllende bildet die neue Wellenfront.

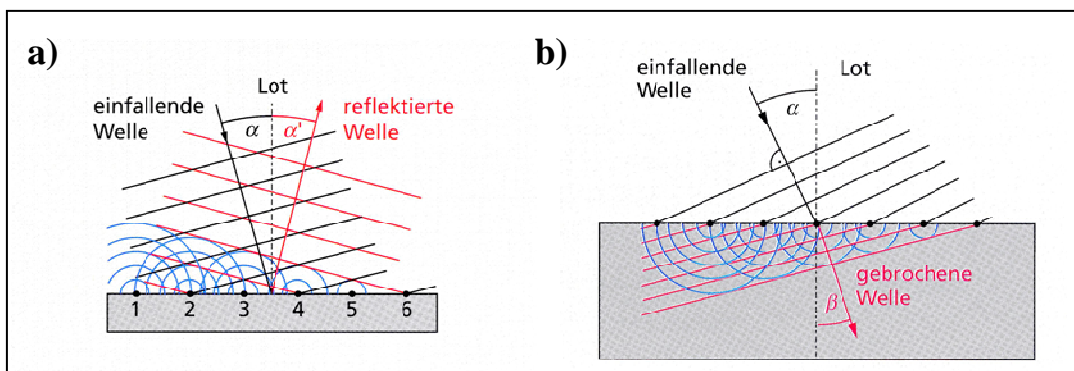


Abb. 4: Reflexion (a) und Brechung (b) nach dem Huygensschen Prinzip

Überträgt man das Prinzip jetzt auf die Reflexion oder die Brechung, so sieht man, dass eine unter dem Winkel  $\alpha$  auftreffende Welle am Ort des Auftreffens neue Elementarwellen erzeugt. Die Erregungszentren 1 bis 6 (vgl. Abb. 4Abb. 4a) werden in gleichmäßigen Abständen angeregt. Da sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht ändert, wird die Einhüllende der neuen Elementarwellen im Winkel  $\alpha$  reflektiert (vgl. Abb. 4a). Da sich bei der Brechung die Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit auch die Wellenlänge durch das neue Medium ändert, sind die neuen Einhüllenden „abgelenkt“, die Welle wird gebrochen (vgl. Abb. 4b).

Das Fermatsche Prinzip besagt: Licht, das über Reflexionen und Brechungen von einem Punkt im Raum zu einem anderen Punkt im Raum gelangt, wird dabei immer den schnellsten Weg nehmen, also denjenigen, bei dem die Lichtlaufzeit am geringsten ist. Der schnellste Weg ist jedoch nicht immer der geometrisch kürzeste, denn beispielsweise bei der Brechung an der Grenzfläche zweier Medien macht der Lichtweg einen Knick (vgl. Abb. 3). Berücksichtigt werden müssen hier die oben bereits angesprochenen unterschiedlichen Geschwindigkeiten in beiden Medien.

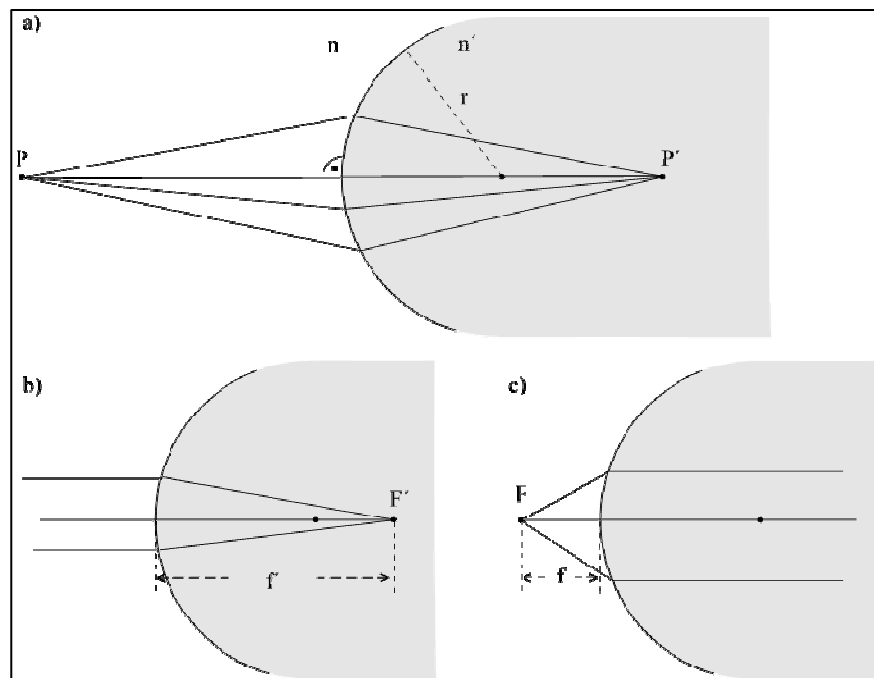
Das Brechungsgesetz lässt sich sowohl über das Huygenssche Prinzip als auch über das Fermatsche Prinzip herleiten und erklären.

- A1 Konstruieren Sie den Weg eines Lichtstrahls, der unter einem Einfallswinkel von  $\alpha_1 = 35^\circ$  auf eine 3 cm dicke planparallele Glasplatte fällt, sie durchdringt und auf der Rückseite wieder austritt (2 Brechungen!). Rechnen Sie dabei mit  $n_{\text{Glas}} = 1,5$  und  $n_{\text{Luft}} = 1$  und notieren Sie die auftretenden Einfalls- und Brechungswinkel. Zeichnen Sie möglichst blattfüllend!

Weitere anschauliche Erläuterungen finden Sie in *Halliday, Resnick, Walker: Physik. Seite 1032* sowie in *Meschede: Gerthsen Physik. 22. Aufl., Seite 173 f.*

## 4.2 Abbildung durch sphärische Flächen

Das Brechungsgesetz (F(2)) gilt auch für gekrümmte Grenzflächen, wie z. B. die Hornhaut des menschlichen Auges, eine stark – und annähernd sphärisch – gekrümmte Trennfläche zwischen Luft und Kammerwasser. Streng genommen existieren zwei Grenzflächen: Luft-Hornhaut und Hornhaut-Kammerwasser. Die Brechungsindizes von Hornhaut und Kammerwasser sind aber fast gleich groß, so dass die Brechung an der zweiten Grenzfläche vernachlässigt werden kann.



**Abb. 5: Abbildung durch eine sphärische Fläche,  $n < n'$**

Für eine sphärische Fläche und den Fall  $n < n'$  (analog zum Auge, wo  $n_{\text{Luft}} < n_{\text{Kammerwasser}}$ ) zeigt Abb. 5 einige Beispiele für die Brechung von Lichtstrahlen, nach dem Brechungsgesetz:

- Strahlen, die von einem Punkt (P) ausgehen, können in diesem Fall hinter der Grenzfläche wieder in einem Punkt (P') gebündelt werden (Abb. 5 a)). Eine solche Grenzfläche hat also abbildende Eigenschaften und man bezeichnet P' als **Bild von P**.
- In Abb. 5 b) ist der Spezialfall dargestellt, dass die Lichtstrahlen parallel auf die Grenzfläche treffen. Sie werden dann in einem Punkt gebündelt, den man als den **bildseitigen Brennpunkt F'** bezeichnet. Sein Abstand zum Flächenscheitel ist die **bildseitige Brennweite f'**.
- Umgekehrt verlaufen Lichtstrahlen, die von einem ganz bestimmten Punkt F vor der Grenzfläche ausgehen, hinter der Grenzfläche parallel zueinander (Abb. 5 c)). Man bezeichnet diesen Punkt als den **gegenstandsseitigen Brennpunkt F** und seinen Abstand zum Flächenscheitel als **gegenstandsseitige Brennweite f**.

Diese Brennweiten hängen sowohl vom Krümmungsradius der Fläche als auch von den Brechungsindizes **beider** beteiligten Medien ab. Zwischen  $f$  und  $f'$  besteht dabei folgender Zusammenhang.

$$F(4) \quad \frac{n}{f} = \frac{n'}{f'}$$

$n$ : Brechungsindex Medium 1  
 $n'$ : Brechungsindex Medium 2  
 $f'$ : bildseitige Brennweite  
 $f$ : gegenstandsseitige Brennweite

Für die Hornhaut des menschlichen Auges gilt z. B.<sup>1</sup>:

$$n = n_{\text{Luft}} = 1$$

$$n' = n_{\text{Kammerwasser}} = 1,336$$

Demnach ist die gegenstandsseitige Brennweite ( $f_{\text{Hornhaut}} = 23 \text{ mm}$ ) um den Faktor 0,75 kleiner als die bildseitige ( $f'_{\text{Hornhaut}} = 31 \text{ mm}$ ).

### 4.3 Abbildung durch dünne Linsen

Im menschlichen Auge beträgt die bildseitige Brennweite des Systems aus Luft, Hornhaut und Kammerwasser ca. 31 mm. Eine Abbildung betrachteter Gegenstände auf der nur ca. 24 mm entfernten Netzhaut wäre damit nicht möglich. Dazu ist eine zusätzliche Bündelung des Lichtes durch die Augenlinse notwendig.

Eine Linse wird in der Regel durch zwei sphärische Flächen begrenzt, die verschiedene Krümmungsradien  $r$  besitzen können. Durch ihre Mittelpunkte wird eine Gerade festgelegt, die man als die **optische Achse** der Linse bezeichnet (vgl. Abb. 6). Vor und hinter der Linse können sich zwei verschiedene Medien (Brechungsindizes  $n$  und  $n'$ ) befinden.

Zur Vereinfachung beschränken wir uns hier auf **symmetrische, bikonvexe, dünne Linsen**, wie in Abb. 6 dargestellt. Solche Linsen werden als **Sammellinsen** bezeichnet, sofern sie sich in Medien befinden, deren Brechungsindex kleiner als der des Linsenmaterials ist. Der Name bezieht sich auf die Eigenschaft, parallel einfallendes Licht in einem Punkt zu sammeln. Als Beispiele haben Sie in Kapitel 4.1 die Glaslinsen in Luft aus dem ersten Versuchsteil und die ölgefüllte Linse in Wasser beim Augenmodell kennengelernt ( $n_{\text{Luft}} < n_{\text{Glas}}$ ;  $n_{\text{Wasser}} < n_{\text{Silikonöl}}$ ).

Die Augenlinse stellt als bikonvexe Linse zwischen Kammerwasser und Glaskörper auch eine Sammellinse dar, ist aber nur näherungsweise symmetrisch, weil sich bei Akkommodation verstärkt der Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche (zum Kammerwasser hin) ändert.

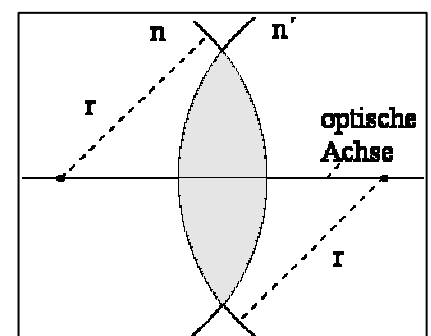


Abb. 6: Bikonvexe, sphärische Linse

Eine Sammellinse hat ähnliche abbildende Eigenschaften, wie die in Kapitel 4.2 besprochene sphärische Fläche. Strahlen, die parallel zur optischen Achse einfallen, werden im **bildseitigen Brennpunkt F'** gebündelt.

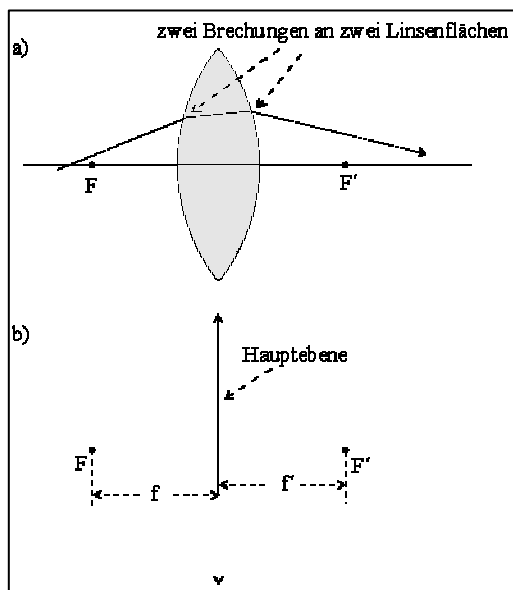
<sup>1</sup> Alle im Folgenden für das menschliche Auge angegebenen Zahlenwerte gelten, soweit nicht anders erwähnt, für ein normalsichtiges "Durchschnittsauge".

Der Begriff "Brennweite" stammt aus der Anwendung von Linsen als **Brenngläser**. Wenn man eine stark sammelnde Linse (Lupe) vor ein Stück Papier in die Sonne hält, so kann man damit – bei geeignetem Abstand zwischen Linse und Papier – das Licht der Sonne in einem sehr kleinen Fleck, dem sogenannten **Brennfleck** bündeln. Im Brennfleck kann man eine so große Lichtintensität und damit eine so hohe Temperatur erreichen, dass das Papier in Brand gerät. Da die Sonne ein sehr – nahezu unendlich – weit entfernter "Gegenstand" ist, liegt dieser Brennfleck gerade im bildseitigen **Brennpunkt** der Linse.

Im Versuchsteil 3.3 haben Sie annähernd parallel einfallende Lichtstrahlen erzeugt, indem Sie die Gegenstandsweite sehr groß gemacht haben. Die Lichtstrahlen, die vom Gegenstand ausgehend dann noch durch die Linse fallen, sind vor der Brechung nahezu parallel und werden in guter Näherung im Brennpunkt  $F'$  gebündelt.

Umgekehrt verlaufen Lichtstrahlen, die vom **gegenstandsseitigen Brennpunkt  $F$**  ausgehen, hinter der Linse parallel zur optischen Achse.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, für eine bestimmte Linse bei vorgegebener Gegenstandsweite  $g$  und Gegenstandsgröße  $G$  die Lage ( $b$ ) und Größe ( $B$ ) des Bildes zu ermitteln. Experimentell haben Sie das im Versuchsteil 3.3 durchgeführt. Es gibt aber auch geometrische und rechnerische Verfahren:

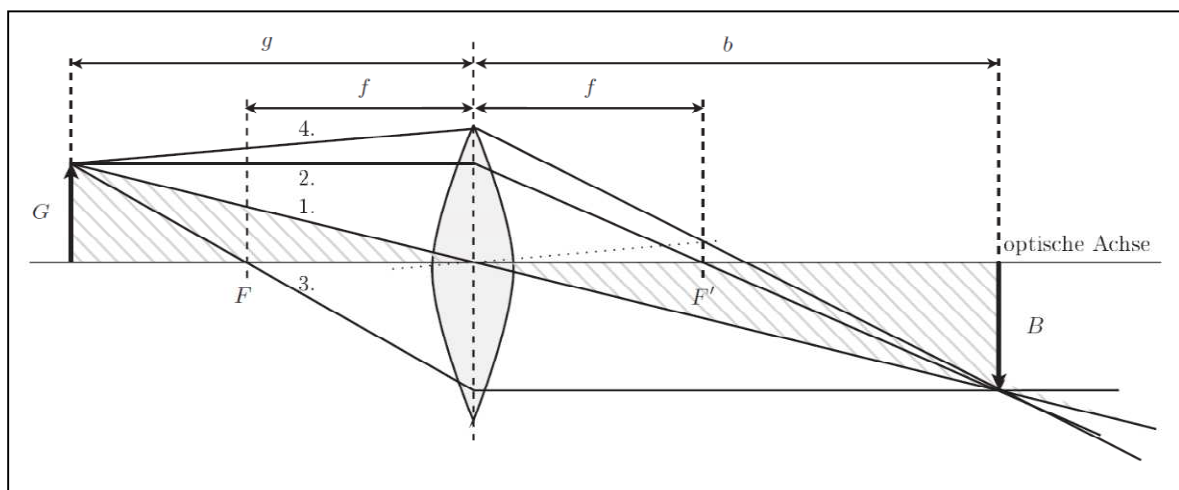


**Abb. 7: Darstellung einer dünnen Linse durch ihre Hauptebene und die Brennpunkte**

Wenn die Form der Linse und ihr Brechungsindex bekannt sind, kann man den Verlauf einzelner Lichtstrahlen durch die Linse nach dem Brechungsgesetz (F(3)) konstruieren. Die Strahlen werden dabei an der vorderen und an der hinteren Linsenfläche gebrochen (Abb. 7 a). Führt man das für mindestens zwei Strahlen durch, die von einem Objektpunkt aus durch die Linse gehen, so gibt deren Schnittpunkt den Bildpunkt  $P'$  an.

Bei dünnen Linsen kann man dieses aufwendige Verfahren vereinfachen, indem man die dünne Linse in der Zeichnung durch die sogenannte Hauptebene ersetzt, die sich an der Position der Linsenmitte befindet (Abb. 7 b). Die Hauptebene ist der Bezugspunkt für die Definition der Brennweiten und der Gegenstands- und Bildweite: Die **gegenstands- bzw. bildseitige Brennweite  $f$  bzw.  $f'$**  ist der Abstand zwischen gegenstands- bzw. bildseitigem Brennpunkt und Hauptebene; die Gegenstands- bzw. Bildweite ist der Abstand zwischen Gegenstand bzw. Bild und Hauptebene.

Zur Konstruktion eines Bildpunktes benötigt man dann nur die Hauptebene, die Brennpunkte und drei ausgezeichnete achsennahe Strahlen, die vom Gegenstand ausgehen und nach folgenden Regeln gebrochen werden. Zusätzlich wird hier noch der Vollständigkeit halber die Konstruktion mit nicht ausgezeichneten Strahlen beschrieben (vgl. Abb. 8)



**Abb. 8: Zur Bildkonstruktion an dünnen Linsen**

- (1) **Brennpunktstrahlen werden an der Hauptebene zu Parallelstrahlen**, d. h. jeder Strahl, der aus Richtung des gegenstandsseitigen Brennpunkts  $F$  auf die Hauptebene trifft, verläuft hinter der Hauptebene parallel zur optischen Achse. (Vgl. Definition von  $F$ )
- (2) **Parallelstrahlen werden an der Hauptebene zu Brennpunktstrahlen**, d. h. jeder Strahl, der parallel zur optischen Achse auf die Hauptebene trifft, verläuft dahinter in Richtung des bildseitigen Brennpunkts  $F'$ . (Vgl. Definition von  $F'$ )
- (3) Unter der Voraussetzung, dass sich auf beiden Seiten der Linse das gleiche Medium befindet ( $n = n'$ ), gilt: **Mittelpunktstrahlen verlaufen geradlinig durch die Hauptebene**, d. h. Strahlen, die auf den Schnittpunkt von Hauptebene und optischer Achse treffen, ändern ihre Richtung nicht.
- (4) Beliebige einfallende Strahlen (nicht ausgezeichnete Strahlen) werden so gebrochen, dass sie in der Brennebene **durch denselben Punkt gehen, wie dessen Parallelverschiebung durch den Mittelpunkt** der Linse.

Abb. 9 zeigt anhand einiger Beispiele, wie damit die Abbildung der Pfeilspitze konstruiert werden kann. Wenn der Pfeil senkrecht auf der optischen Achse steht, gilt das auch für das Bild. Deshalb reicht die Konstruktion dieses einen Bildpunktes, um Lage und Größe des gesamten Bildes angeben zu können.

A2 Wählen Sie aus ihren Messungen (Versuchsteil 3.2) mit Linse 1 **eine** Gegenstandsweite  $g$ , für die Sie  $b$  und  $B$  bestimmt haben. Führen Sie für dieses Beispiel die (vereinfachte) Bildkonstruktion durch:  $g$  und  $G$  und die Brennweiten von Linse 1 ( $f = f'$ ) entnehmen Sie dafür Ihrem Messprotokoll,  $b$  und  $B$  bestimmen Sie mit Hilfe der Bildkonstruktion. (Die Zeichnung sollte nicht mehr als ein DIN-A4-Blatt einnehmen, dafür aber möglichst blattfüllend sein. Wählen Sie dazu einen geeigneten verkleinerten Maßstab!)

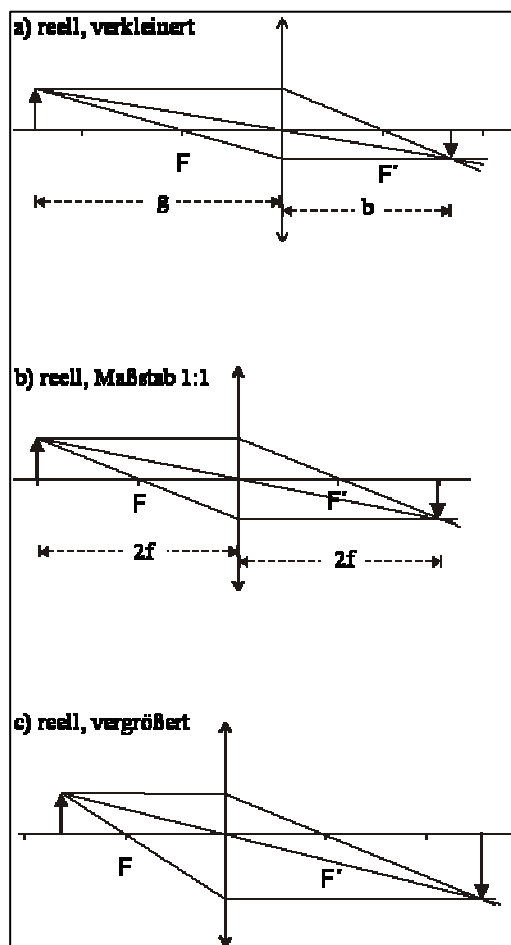


Abb. 9: Beispiele zur Abbildung durch dünne Linsen

In Ihren Messungen und in den Beispielen in Abb. 9 a) bis c) zeigt sich, dass in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite, das Bild **vergrößert** ( $B > G$ ) oder **verkleinert** ( $B < G$ ) sein kann. Auch die Bildweite hängt offensichtlich von der Gegenstandsweite ab. Diese Beziehungen, die Sie beide im Versuchsteil 3.2 qualitativ untersucht haben, kann man quantitativ mit Hilfe der folgenden Formeln beschreiben:

$$F(5a) \quad \text{Abbildungsgleichung} \quad \frac{f}{g} + \frac{f'}{b} = 1$$

$$F(1a) \quad \text{Abbildungsmaßstab} \quad \frac{B}{G} = \frac{f}{g-f} = \frac{b-f'}{f'}$$

$f$ : gegenstandsseitige Brennweite

$f'$ : bildseitige Brennweite

$g$ : Gegenstandsweite

$b$ : Bildweite

$G$ : Größe des Gegenstands

$B$ : Größe des Bildes

Zwischen  $f$  und  $f'$  besteht dabei der gleiche Zusammenhang wie bei sphärischen Flächen:  $\frac{n}{f} = \frac{n'}{f'}$ .

Sie haben also nur dann den gleichen Wert, wenn sich – wie in den Versuchsteilen 3.2 bis 3.5 – vor und hinter der Linse das gleiche Medium befindet. Dann vereinfachen sich Abbildungsgleichung und Abbildungsmaßstab zu:



F(5)    Abbildungsgleichung                       $\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$

F(1)    Abbildungsmaßstab                       $\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$

Bei der Abbildung im Auge kann man die Funktion der Netzhaut mit der eines Schirms vergleichen, auf dem man ein reelles Bild auffängt. Ihren Messungen (3.2) und dem Abbildungsmaßstab (F(1a)) können Sie entnehmen, dass für **vergrößerte** reelle Bilder  $b > 2f'$  gelten muss. Bei  $f' < b < 2f'$  (was gleichbedeutend ist mit  $\frac{1}{2}b < f' < b$ ) erhält man **verkleinerte** reelle Bilder. Im Auge liegt die Bildweite  $b$  fest und durch Akkommodation kann  $f'$  nur im Bereich zwischen  $\frac{1}{2}b$  und  $b$  variiert werden. Deshalb entstehen **auf der Netzhaut nur verkleinerte, reelle, umgekehrte und seitenverkehrte Bilder**.

A3 Stellen Sie die Ergebnisse für das Beispiel aus der vorherigen Aufgabe (Bildkonstruktion) für die Bildgröße  $B$  mit Ihrem Messwert und dem berechneten Wert (inkl. Unsicherheit) aus Versuchsteil 3.2 in einer **Tabelle** zusammen und notieren Sie Gründe für eventuelle Abweichungen.

Ausführliche Herleitungen sowie weiterführende Inhalte, wie beispielsweise die Abbildung durch dicke Linsen, finden Sie in *Demtröder: Experimentalphysik II. Elektrizität und Optik. 2. Aufl., Seite 265 – 270* sowie *Meschede: Gerthsen Physik. 22. Aufl., Seite 481 – 485*.

#### 4.4 Fehlerrechnung

A4 Berechnen Sie aus Ihren in Versuchsteil 3.2 gemessenen Werten  $G$ ,  $g$  und  $b$  die Bildgröße  $B_{ber}$  für Linse 1 und tragen Sie Ihre Ergebnisse in die vierte Spalte der Tabelle ein (Seite 3). Vergleichen Sie die gemessenen und berechneten Werte miteinander? Wie kommen die Unterschiede zustande?

A5 Übertragen Sie die Formel für  $\Delta B_{ber}$  aus Versuchsteil 3.2 (Seite 5) und berechnen Sie die Werte für Linse 1. Tragen Sie diese in die fünfte Spalte der Tabelle (Versuchsteil 3.2, Seite 3) ein.

$\Delta B_{ber} = \dots\dots\dots$

A6 Diskutieren Sie die Genauigkeit Ihrer Messungen! Wie groß sind die Abweichungen  $\Delta B_{ber}$  prozentual? (Ein ungefährender Wert reicht.) Wie könnte die Versuchsanordnung im Bezug auf die Vermeidung von Fehlern optimiert werden?

Experimente dienen dazu, theoretische Modelle zu überprüfen und vorausgesagte physikalische Größen quantitativ zu ermitteln bzw. diese zu bestätigen. Der durch Messen bestimmte Wert einer Größe ist nie exakt. Er ist mit einer Unsicherheit behaftet, welche ein Intervall um den Messwert vorgibt, in welchem neue Messwerte zu erwarten sind, wenn die Messung unter gleichbleibenden Bedingungen wiederholt wird. In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Unsicherheit einer Messung im Rahmen dieses Praktikums bestimmt wird.

Oftmals werden Messabweichungen und Unsicherheiten auch als „Fehler“ bezeichnet. Nach DIN 1319 ist dies allerdings zu vermeiden, denn Messabweichungen sind jene Fehler, die während einer Messung auftreten und Unsicherheiten solche, die bei der Angabe von Messergebnissen verwendet werden. In Kapitel 3.2 haben Sie die Unsicherheit der berechneten Bildgröße bestimmt. Einige Begriffe wie z. B. Fehlerrechnung, Fehlerfortpflanzung und Fehlerquelle werden hier aufgrund der besseren Lesbarkeit trotzdem benutzt.

Gemäß ihres Ursprungs unterscheidet man prinzipiell drei Arten von Messabweichungen: grobe Fehler, systematische Messabweichungen und zufällige Messabweichungen.

**Grobe Fehler** entstehen beispielsweise durch den falschen Gebrauch von Messgeräten und durch Verwechslung von Messwerten. Die so entstandenen Abweichungen können nur durch sorgfältiges Arbeiten vermieden, jedoch nicht nachträglich korrigiert werden.

**Systematische Abweichungen** können z. B. durch die Benutzung falsch geeichter Messgeräte, die Verwendung unreiner Substanzen, vernachlässigte physikalische Effekte, schräges Ablesen von Skalen oder auch durch die Anwendung von Näherungsformeln (vgl. F(8)) auftreten. Sie verfälschen das Messergebnis stets in die gleiche Richtung und sind – sofern sie bekannt sind – prinzipiell beliebig reduzierbar. Dies erfordert jedoch oft großen Aufwand und ist daher unter Praktikumsbedingungen kaum möglich. Systematische Abweichungen werden bei der Fehlerrechnung korrigiert oder vernachlässigt. Oftmals sind sie auch gar nicht bekannt. Das schließt jedoch eine qualitative Diskussion von Messwertabweichungen systematischer Herkunft nicht aus.

**Zufällige Abweichungen** haben ihren Ursprung im Einfluss der Messgeräte (z. B. Schwankung der Netzspannung), im Einfluss der Umgebung (z. B. Temperaturschwankungen), in Änderungen des Wertes der Messgröße sowie in nicht einseitig gerichtete Einflüsse des Beobachters (z. B. beim Ablesen einer Skala). Diese Abweichungen bewirken in ihrer Summe eine statistisch rein zufällige Schwankung der Messergebnisse und werden deshalb oft auch statistische Abweichungen genannt. Sie sind unvermeidbar und verändern das Ergebnis in beide Richtungen. Erst die mehrfach wiederholte Durchführung einer Messung ermöglicht es, die dabei gewonnenen Messwerte mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der Statistik zu behandeln. (Vgl. Versuch B2 *Radioaktivität*) Dies bildet die Grundlage der Fehlerrechnung, welche dazu dient, die zufällige Abweichung durch Unsicherheiten abzuschätzen.

Der wahre Wert  $x_w$  einer physikalischen Größe kann durch Messen nicht genau bestimmt werden. Die Messung liefert einen Wert  $\bar{x}$ , der sich aufgrund systematischer und zufälliger Abweichungen vom wahren Wert unterscheidet. Die zufällige Abweichung vom sogenannten Erwartungswert wird durch die Unsicherheit  $\Delta x$  abgeschätzt. Jeder Messwert muss also korrekterweise in der Form  $x = \bar{x} \pm \Delta x$  angegeben werden.

Jedes Gerät hat eine maximale Ablesegenauigkeit, welche durch die kleinste ablesbare Einheit im entsprechenden Messbereich definiert ist. Im Rahmen dieses Versuches ist es praktikabel, die Streuung der Messwerte um ihren Erwartungswert durch die Ablesegenauigkeit abzuschätzen. Das haben Sie in Versuchsteil 3.2 gemacht.

Wird eine Größe  $x$  aus mehreren fehlerbehafteten Größen  $a, b, c \dots$  berechnet, so übertragen sich die einzelnen Abweichungen  $\Delta a, \Delta b, \Delta c \dots$  auf das Ergebnis der Rechnung. Um die Unsicherheit der berechneten Größe zu bestimmen, muss das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz angewendet werden. Das haben Sie in Kapitel 3.2 für einen speziellen Fall kennen gelernt (vgl. F(2)). Das Fehlerfortpflanzungsgesetz (nach DIN 1319: *Fortpflanzung der Messunsicherheiten*) gibt eine Möglichkeit, die Unsicherheit des Messergebnisses  $\Delta x$  mit den Unsicherheiten der einzelnen Eingangsgrößen  $\Delta a, \Delta b, \Delta c \dots$  abzuschätzen.

Wir haben also:  $a = \bar{a} \pm \Delta a, \quad b = \bar{b} \pm \Delta b, \quad c = \bar{c} \pm \Delta c \quad \dots$  mit  $x = x(a, b, c \dots)$

Dann gilt:  $x = \bar{x} \pm \Delta x$

Und weiter:

F(6) Fehlerfortpflanzungsgesetz 
$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial a} \cdot \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b} \cdot \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial c} \cdot \Delta c\right)^2 + \dots}$$

## 4.5 Linsensysteme

Nur in sehr einfachen Anwendungen, wie der Lupe, benutzt man eine einzelne Linse zur Abbildung. Bei anspruchsvolleren optischen Geräten, wie z. B. dem Mikroskop und dem Fotoapparat, setzt man in der Regel Linsensysteme ein, d. h. eine Kombination mehrerer Linsen. Auch beim Auge erfolgt die Abbildung durch die brechende Wirkung der Hornhaut **und** der Augenlinse, also durch ein **Linsensystem** mit zwei Komponenten. Bei Fehlsichtigkeit kommt als dritte Komponente häufig noch ein Brillenglas oder eine Kontaktlinse hinzu.

Unter der Voraussetzung, dass die einzelnen Komponenten sehr eng hintereinander stehen (d. h. der Abstand  $d$  der Einzellinsen muss deutlich kleiner als deren Brennweiten sein), kann man die Wirkung eines Linsensystems sehr einfach durch die Beiträge seiner Komponenten beschreiben.

Dazu benötigt man den Begriff der **Brechkraft  $D$** . Diese Größe, die im Bereich der Augenheilkunde und der Augenoptik wesentlich gebräuchlicher ist als die Brennweite, ist folgendermaßen definiert:

F(7) 
$$D = \frac{n}{f}$$

D: Brechkraft (SI-Einheit: 1 dpt = 1 Dioptrie = 1  $\frac{1}{m}$ )  
 $n$ : Brechungsindex Medium 1 (Gegenstandsseite)  
 $f$ : gegenstandsseitige Brennweite

Hohe Brechkraft bedeutet also kleine Brennweite, die Linse bricht das einfallende Licht sehr stark. Umgekehrt entspricht eine große Brennweite einer geringen Brechkraft, die Linse bricht das einfallende Licht sehr wenig.

Bei Brillengläsern und Kontaktlinsen wird z. B. nicht die Brennweite, sondern die Brechkraft ("Glasstärke") angegeben. Auch auf den im Augenmodell verwendeten Brillengläsern ist die Brechkraft angegeben.

A7 Berechnen Sie die Brechkräfte der in Versuchsteilen 3.2 und 3.3 verwendeten Linsen und umgekehrt die Brennweite der beim Augenmodell zur Korrektur der **Presbyopie** und der **Hyperopie** verwendeten Brillengläser.

Kombiniert man nun, wie in Abb. 10 gezeigt, zwei Linsen mit den Brechkraften  $D_1$  und  $D_2$ , so kann man die Brechkraft des Linsensystems nach folgender Formel berechnen:

$$F(8) \quad D_{\text{System}} = D_1 + D_2 - \frac{d}{n} \cdot D_1 \cdot D_2$$

$D_{\text{System}}$ : Brechkraft des Linsensystems (SI-Einheit: 1 dpt = 1  $\frac{1}{\text{m}}$ )

$D_1, D_2$ : Brechkraft Linse 1 bzw. 2 (SI-Einheit: 1 dpt = 1  $\frac{1}{\text{m}}$ )

$d$ : Abstand zwischen den Hauptebenen (SI-Einheit: 1 m)

$n$ : Brechungsindex des Mediums zwischen den Linsen (z. B. das Kammerwasser mit  $n = 1,336$ )

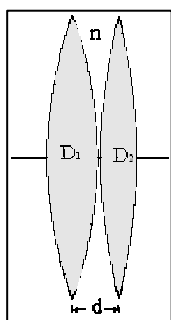


Abb. 10: Linsensystem

In dem Fall, dass der Abstand zwischen den Einzellinsen sehr klein gegenüber deren Brennweiten ist ( $d \approx 0$ ), wird der dritte Term in Gleichung F(8) sehr klein gegenüber  $D_1 + D_2$  und kann vernachlässigt werden.

Dann vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$F(9) \quad D_{\text{System}} = D_1 + D_2$$

**Die Brechkraft der Einzellinsen addieren sich zur Brechkraft des Linsensystems.**

Für Überslagsrechnungen und prinzipielle Überlegungen kann man in der Regel mit Gleichung F(9) arbeiten. Im Einzelfall muss man den Einfluss des dritten Terms (als Korrekturterm) in Gleichung F(8) abschätzen. Merklichen Einfluss hat dieser z. B. bei der Anpassung von Korrekturlinsen für Fehlsichtigkeit: Kontaktlinsen werden direkt auf die Hornhaut gesetzt,  $d$  ist also wesentlich kleiner als bei einem Brillenglas. Um die gleiche Korrekturwirkung zu erreichen, muss deshalb das Brillenglas eine größere Brechkraft besitzen als die Kontaktlinse.

- A8 Beim menschlichen Auge gilt: Brechkraft der Hornhaut  $D_{\text{Hornhaut}} \approx 43$  dpt, Abstand von Hornhaut und Augenlinse  $d \approx 5,6$  mm, Brechkraft der entspannten Augenlinse  $D_{\text{Linse}} \approx 19$  dpt, Brechungsindex des Kammerwassers  $n \approx 1,336$ . Berechnen Sie mit diesen Angaben die Brechkraft des gesamten Auges mit und ohne den Korrekturterm und geben Sie die prozentuale Abweichung (s. u.) an.

$$\frac{D_{\text{korrigiert}} - D_{\text{unkorrigiert}}}{D_{\text{korrigiert}}} \cdot 100 \%$$

Das Linsensystem besitzt also, wie die einzelne Linse, Brennweiten und eine Brechkraft, und auch die Beziehungen zwischen Gegenstands- und Bildweite und Bildgröße (F(5a), F(1a)) können übertragen werden.

## 5. Transfer und interdisziplinäre Anknüpfungspunkte

### 5.1 Das Auge als Linsensystem mit variabler Brennweite, Nah- und Fernpunkt

Das menschliche Auge muss Gegenstände, die sich in sehr unterschiedlichen Entfernungen befinden, auf der Netzhaut scharf abbilden können. Da weder die Augenlinse noch die Netzhaut verschoben werden können, ist die Bildweite  $b \approx 24$  mm durch die Anatomie des Auges vorgegeben. Außerdem ist die Brechkraft der Hornhaut mit  $D_{\text{Hornhaut}} \approx 43$  dpt fest. Um eine scharfe Abbildung für verschiedene Gegenstandsweiten  $g$  zu erhalten, muss also die Brennweite und damit die Brechkraft der Augenlinse verändert werden. Das geschieht im Wesentlichen durch den Ziliarmuskel, der durch Anspannung die Linse stärker krümmt und so ihre Brennweite verkürzt, d. h. die Brechkraft erhöht. Diesen Vorgang bezeichnet man als **Akkommodation**. Das Prinzip der Akkommodation haben Sie im Versuchsteil 3.4 untersucht. Mit den drei verschiedenen Linsen konnten Sie jedoch nur für drei verschiedene Gegenstandsweiten eine scharfe Abbildung erreichen. Beim Augenmodell war dann, wie im Auge, eine kontinuierliche Veränderung der Brennweite möglich. Deshalb konnten Sie innerhalb gewisser Grenzen für jede beliebige Gegenstandsweite eine scharfe Abbildung erzeugen.

Die geringste Brechkraft besitzt die Augenlinse und damit (nach F(7) bzw. F(8)) das gesamte Auge im entspannten Zustand. Je kleiner die Brechkraft ist, desto weiter entfernte Objekte werden auf der Netzhaut scharf abgebildet (vgl. 3.7). Der entspannte Zustand mit der geringsten Brechkraft ( $D_{\text{minimal}} \approx 58,6$  dpt) bestimmt also die maximale Entfernung, in der man scharf sehen kann, den sogenannten **Fernpunkt**. Durch Anspannung des Ziliarmuskels können nähere Objekte betrachtet werden. Eine untere Grenze für die Gegenstandsweite, der **Nahpunkt**, ist durch die maximale Brechkraft von Augenlinse und Hornhaut ( $D_{\text{maximal}} \approx 72,6$  dpt) bei maximaler Anspannung des Ziliarmuskels festgelegt (vgl. Abb. 11, emmetropes Auge bei Nahakkommodation). Er liegt etwa 10 cm vor der Hornhaut, bei älteren Menschen weiter entfernt. Objekte, die sich näher am Auge befinden, können nicht scharf gesehen werden.

Das menschliche Auge ist dafür ausgelegt, in möglichst großer Entfernung noch scharf zu sehen, denn in der Entwicklungsgeschichte war es wesentlich, Feinde und Beute in großer Entfernung zu erkennen. **Der Fernpunkt des emmetropen Auges liegt also im Unendlichen.** Da das Licht von solchen (unendlich) weit entfernten Objekten fast parallel auf das Auge fällt, wird es nach Definition der Brennpunkte im bildseitigen Brennpunkt des Systems Hornhaut-Augenlinse gebündelt. Das bedeutet, dass die Netzhaut sich im bildseitigen Brennpunkt des entspannten Auges befinden muss. Mit anderen Worten: Die über die Länge des Glaskörpers vorgegebene Bildweite von ca. 24 mm muss gerade die bildseitige Brennweite des entspannten Auges sein (vgl. Abb. 11, emmetropes Auge bei Fernakkommodation).

Die Differenz zwischen maximaler und minimaler Brechkraft bezeichnet man als **Akkommodationsbreite**. Sie beträgt beim jungen Menschen maximal 14 dpt ( $= 72,6 \text{ dpt} - 58,6 \text{ dpt}$ ), nimmt aber mit zunehmendem Alter ab, weil die Flexibilität der Augenlinse durch Wasserverlust nachlässt. Der Fernpunkt bleibt also im Unendlichen ( $D_{\text{minimal}}$  bleibt), der Nahpunkt rückt aber weiter vom Auge weg ( $D_{\text{maximal}}$  nimmt ab). Diese Veränderung bezeichnet man als **Presbyopie** (Altersweitsichtigkeit), sie äußert sich z. B. darin, dass ältere Menschen beim Lesen den Text weiter vom Auge weg halten, bzw. eine Lesebrille tragen.

### 5.2 Fehlsichtigkeit: Myopie, Hyperopie und Presbyopie

Wenn die oben erwähnte Voraussetzung, dass die Netzhaut sich im bildseitigen Brennpunkt des entspannten Auges befindet, nicht erfüllt ist, spricht man von Myopie (Kurzsichtigkeit) bzw. Hyperopie (Weitsichtigkeit).

Beim myopen Auge befindet sich die Netzhaut zu weit hinten („das Auge ist zu lang“, vgl. Abb. 11), die vorgegebene Bildweite ist also größer als die bildseitige Brennweite des entspannten Auges. Deshalb werden (unendlich) weit entfernte Objekte immer **vor** der Netzhaut abgebildet, und auf der Netzhaut entsteht ein unscharfes Bild (Abb. 11, myopes Auge, Fernakkommodation). Wie Sie im Versuchsteil 3.8 festgestellt haben, liegt dadurch der Nahpunkt näher an der Hornhaut (Abb. 11, myopes Auge, Nahakkommodation) und das Bild ist größer als beim emmetropen Auge.

Beim hyperopen Auge liegen umgekehrte Verhältnisse vor: Die Netzhaut befindet sich zu weit vorn („das Auge ist zu kurz“, vgl. Abb. 11), die vorgegebene Bildweite ist also kleiner als die bildseitige Brennweite des entspannten Auges. Deshalb werden (unendlich) weit entfernte Objekte immer hinter der Netzhaut abgebildet und auf der Netzhaut entsteht ein unscharfes Bild (Abb. 11, hyperopes Auge, Fernakkommodation). Der Hyperope kann, im Gegensatz zum Myopen, trotzdem in der Ferne scharf sehen, muss dazu aber etwas akkommodieren, der Ziliarmuskel kann ist nie ganz entspannt. Der Nahpunkt ist beim Hyperopen weiter von der Hornhaut entfernt (Abb. 11, hyperopes Auge, Nahakkommodation) und das Bild ist kleiner als beim Emmetropen. Das liegt hier jedoch nicht an der nachlassenden Brechkraft der Augenlinse (Presbyopie), sondern an der Verformung des Auges.

Presbyopie ist, wie schon erwähnt, eine Alterserscheinung, die bewirkt, dass sich der Nahpunkt vom Auge entfernt. Da die Lage des Fernpunktes dadurch nicht verändert wird, kann eine schon bestehende Myopie durch zunehmende Presbyopie nicht kompensiert werden.

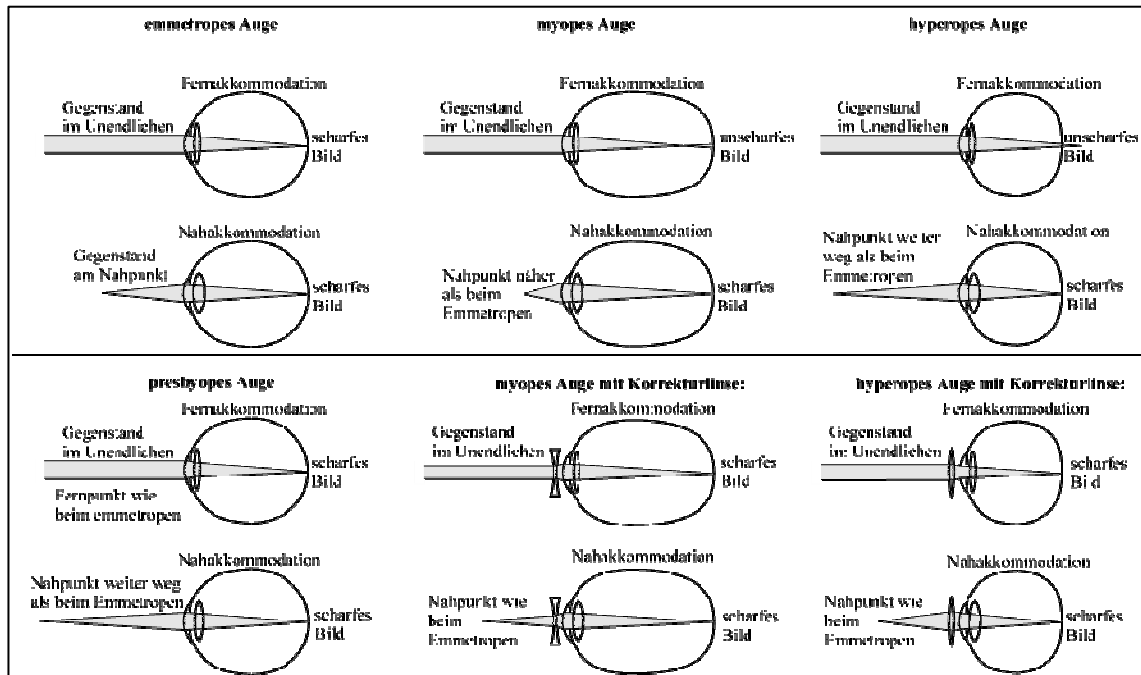


Abb. 11: Emmetropes, presbyopes, myopes und hyperopes Auge und die Wirkung der Korrekturlinsen

### 5.3 Korrekturlinsen für Myopie, Hyperopie und Presbyopie; Brillen

Zur Korrektur von Myopie und Hyperopie kann man Einstärkengläser verwenden, die die Brechkraft des Systems Hornhaut-Augenlinse verkleinern bzw. vergrößern. Da sie konstante Brechkraft besitzen, vergrößern sie nicht den Akkommodationsbereich sondern verschieben ihn nur und passen ihn dadurch an die Verformung des Auges an.

Bei Myopie muss man die Brechkraft des Auges verringern. Als Korrekturlinse benutzt man dazu eine **Zerstreuungslinse**, die parallel einfallendes Licht divergent macht (Abb. 12). Das Licht scheint dann von einem Punkt  $F'$  vor der Linse zu kommen, den Abstand dieses Punktes von der Hauptebene bezeichnet man wieder als (bildseitige) Brennweite  $f'$ . Die zerstreue Eigenschaft solcher Linsen drückt man durch **eine negative Brechkraft** aus.

Bringt man eine solche Zerstreuungslinse mit geeigneter (negativer) Brechkraft vor das Auge, so werden parallel einfallende Strahlen nicht mehr vor, sondern auf der Netzhaut gebündelt (Abb. 12, myopes Auge mit Korrekturlinse bei Fernakkommodation). Diese Verringerung der Brechkraft durch die Brille wirkt sich aber auch im Nahbereich aus: Der Nahpunkt rückt weiter von der Hornhaut weg (Abb. 12, myopes Auge mit Korrekturlinse bei Nahakkommodation) und das Bild wird kleiner. Myope erzeugen also ohne Brille größere Bilder auf der Netzhaut als mit Brille.

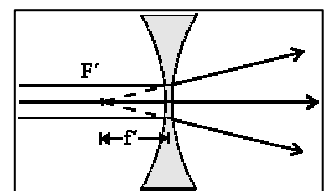


Abb. 12: Zerstreuungslinse

Bei Hyperopie wählt man eine Sammellinse, um die Brechkraft des Auges zu erhöhen. Dadurch werden parallel einfallende Strahlen schon vom entspannten Auge auf der Netzhaut gebündelt (Abb. 11, hyperopes Auge mit Korrekturlinse bei Fernakkommodation). Im Nahbereich führt diese Erhöhung der Brechkraft durch die Brille dazu, dass der Nahpunkt wieder näher an die Hornhaut rückt (Abb. 11, hyperopes Auge mit Korrekturlinse bei Nahakkommodation) und das Bild größer wird.

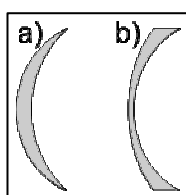


Abb. 13: Meniskuslinsen

In ähnlicher Weise kann Presbyopie durch eine Sammellinse korrigiert werden, die die Brechkraft des Auges im gesamten Akkommodationsbereich erhöht. Bei Verwendung eines Einstärkenglasses muss man dann in Kauf nehmen, dass auch der Fernpunkt näher ans Auge rückt und die Brille nur für den Nahbereich geeignet ist („Lesebrille“).

Brillengläser sind in der Praxis konkav-konvexe Linsen, sogenannte Meniskuslinsen (vgl. Abb. 13). Es hängt von den Krümmungsradien beider Linsenflächen ab, welche Brechkraft eine solche Linse besitzt und ob sie als Sammellinse (Abb. 13 a) oder Zerstreuungslinse (Abb. 13 b) wirkt.

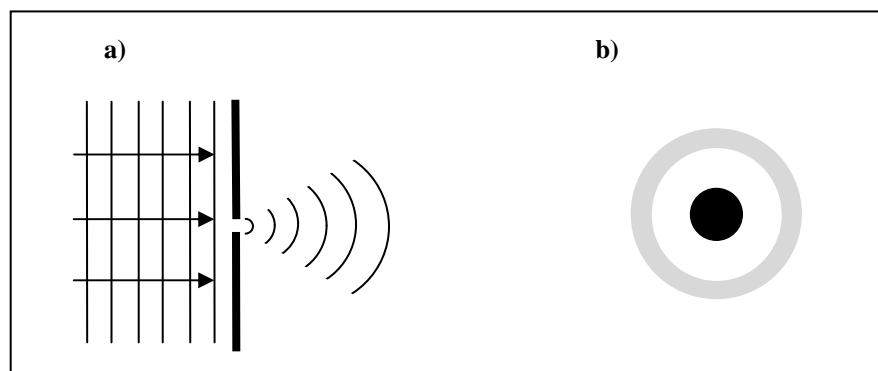
## 5.4 Wellencharakter des Lichts

Die Tatsache, dass sichtbare Gegenstände selbst Licht aussenden oder Licht zurückwerfen, ist erst seit 1000 n. Chr. bekannt. Seitdem stellte man sich das von einem Punkt ausgesandte Licht als ein Bündel von Licht**strahlen** vor, entlang derer sich die „Lichtenergie“ ausbreitet. Senkrecht auf diesen Strahlen stehen Wellenfronten. Lichtstrahlen breiten sich geradlinig aus und wechselwirken nicht mit anderen Strahlen.

Wird von einem weit entfernten, leuchtenden Punkt bzw. einem leuchtenden Gegenstand (wie z. B. Ihrem Gegenstand in Versuchsteil 3.7) mittels einer Blende ein Teil ausgeblendet und nur ein kleiner Teil durchgelassen, erhält man hinter der Blende ein paralleles Bündel dieser Strahlen. Bildet man das Bündel hinter der Blende auf einen Schirm ab, so sieht man ein umgekehrtes Bild. Je mehr die Blende zugezogen, also je kleiner das Loch für das parallele Strahlenbündel wird, desto schärfer – aber auch dunkler – wird das Bild auf dem Schirm.

Doch nicht nur die Helligkeit begrenzt die Abbildung, je kleiner die Öffnung wird, desto mehr tritt ein weiteres Phänomen in den Vordergrund: Beugung. Die Annahme der geometrischen Optik, Licht breitet sich längs dieser geradlinigen Strahlen aus, ist also nicht haltbar. Erst Augustin Jean Fresnel und Thomas Young bestätigten im 19. Jahrhundert die von Christiaan Huygens formulierte Wellentheorie. Licht ist demnach eine **elektromagnetische Welle**, die mittels Wellenlänge sowie Amplitude beschrieben werden kann.

Bei der Beugung wird das Licht durch ein Hindernis – wie beispielsweise die Ränder einer Lochblende – „abgelenkt“. Dort entstehen neue punktförmige Kugelwellen (Elementarwellen) nach dem Huygensschen Prinzip, die in den geometrischen Schatten des Hindernisses eintreten können (Abb. 14a). Das Bild wird unscharf. Durch Überlagerung der Elementarwellen, die sogenannte Interferenz, können je nach Öffnungsgeometrie und -größe verschiedene Bilder entstehen (Abb. 14 b).



**Abb. 14: Beugung an einer kreisförmigen Öffnung**

Selbst Reflexion und Brechung lassen sich vollständig nur über das Wellenmodell erklären. Für einfache Anwendungen, wie die in diesem Versuch durchgeführten Experimente, Abbildungen und Rechnungen ist das Modell der geometrischen Optik mit ihren Licht**strahlen** eine gute Näherung.

Zur Wellentheorie des Lichts sowie Beugung finden Sie ausführliche Erläuterungen in *Halliday, Resnick, Walker: Physik. Seite 1032 – 1037*.

## 5.5 Dispersion

Wie Sie erfahren haben, ist Licht eine elektromagnetische Welle, charakterisiert durch ihre Wellenlänge. Der für Menschen sichtbare Bereich erstreckt sich von etwa 400 – 800 nm (nm = Nanometer), wobei blaues Licht eine kleine Wellenlänge (etwa 420 bis 490 nm) und rotes Licht eine eher große Wellenlänge (etwa 650 bis 750 nm) besitzt. Weißes Licht besteht aus allen Farben des Spektrums.

In Kapitel 3.11 haben Sie festgestellt, dass Sie bei verschiedenfarbigen Lichtquellen (rot und blau) die Augenlinse unterschiedlich stark akkomodieren müssen, um ein scharfes Bild auf dem Schirm zu erzeugen. Wie Sie gelernt haben, ändern Sie am Augenmodell mit der Füllmenge des Silikonöls die Wölbung der Linse und damit die Brennweite (vgl. Kapitel 3.6). Anders gesagt: Bei gleicher Brennweite (und somit Brechkraft bzw. Linsenwölbung) werden die Gegenstände nicht im selben Abstand von der Linse (Bildweite) scharf abgebildet. Licht wird also abhängig von der Wellenlänge verschieden stark gebrochen; Licht geringerer Wellenlänge (blau) wird dabei stärker gebrochen als Licht größerer Wellenlänge (rot). Genau diese Anhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge nennt man Dispersion. Aufgrund dieses Phänomens scheint Ihnen ein rotes B auf blauem Untergrund „entgegentzukommen“.





Beim Auge ist der reguläre Astigmatismus eine Fehlsichtigkeit, die durch eine veränderte Hornhautkrümmung entsteht. Beim normalsichtigen Auge ist die Hornhaut zwar nicht kugelförmig gekrümmt, jedoch besitzt sie in senkrechter und waagerechter Richtung bestimmte, genau aufeinander abgestimmte Krümmungen. Diese Krümmungen sind notwendig, damit auch Licht, das von der Seite, von oben oder unten einfällt, genauso die Netzhaut erreicht, wie das Licht, das von vorne kommt. Ist die Hornhaut jedoch in einer der Richtungen (Meridian) gegenüber der physiologisch richtigen Krümmung verändert, z. B. stärker oder schwächer gebogen, wird das Licht, das durch die Pupille hindurchtritt, verschieden gebrochen und in den einzelnen Meridianen unterschiedlich aufgelöst. Korrigiert werden kann diese Fehlsichtigkeit durch speziell gefertigte Kontaktlinsen und Brillen.

Die wichtigsten Abbildungsfehler von Linsen und deren Korrekturmöglichkeiten können nachgelesen werden in *Demtröder: Experimentalphysik II. 2. Aufl., Elektromagnetismus und Optik. Seite 273 – 280.*

## 5.7 Linsensysteme in optischen Geräten: Das Mikroskop

Abb. 18 zeigt schematisch den Strahlengang eines Lichtmikroskops. Der Gegenstand wird – bereits vergrößert – durch das Objektiv auf ein reelles Zwischenbild zwischen Objektiv und Okular abgebildet. Das Okular vergrößert dann dieses Zwischenbild wie eine Lupe. Die Brennweiten von Objektiv und Okular liegen bei einem Mikroskop im Bereich Millimeter bzw. Zentimeter. Grundsätzlich gilt: Je kleiner die Brennweiten der Linsen, desto größer ist die Vergrößerung des Objekts; jedoch nimmt die Lichtintensität mit der Vergrößerung ab. Darüber hinaus können die Brennweiten der Linsen nicht beliebig klein sein. Eine Möglichkeit, die Bildqualität zu verbessern, besteht darin, eine Doppellinse – also wiederum ein Linsensystem – als Okular zu verwenden. Den genauen Aufbau sowie die Möglichkeiten und Grenzen des Mikroskops lernen Sie im Versuch „Mikroskop“ genauer kennen.

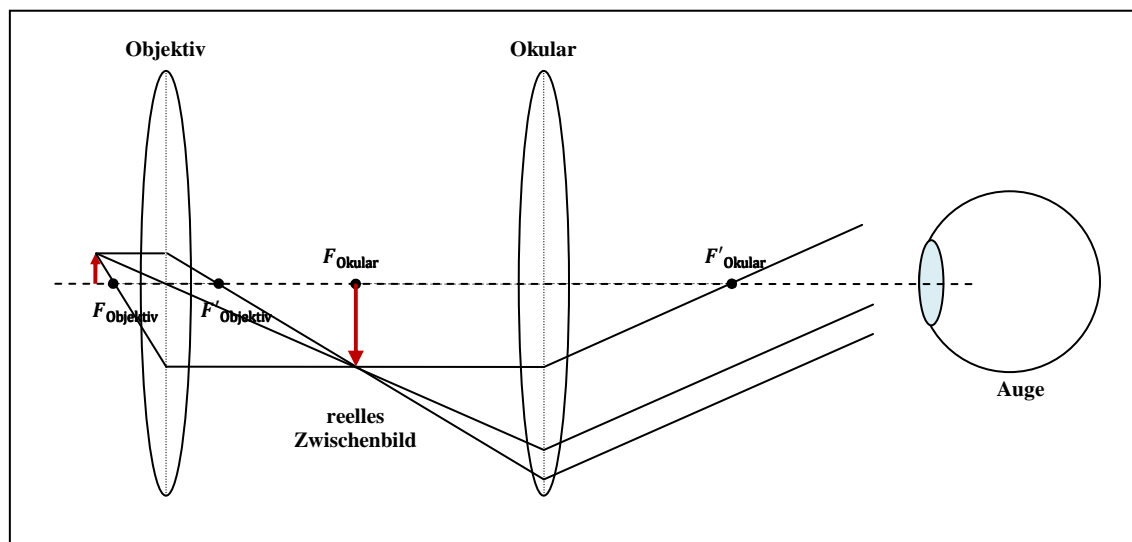


Abb. 18: Schematischer Strahlengang eines Mikroskops

## 5.8 Bionik: Technische Umsetzung des Fliegenauges

Die Bionik umfasst eine Vielzahl verschiedener Disziplinen, allen voran Biologie und Technik. Konstruktionen aus Natur und Umwelt werden im Hinblick auf technische Anwendungen untersucht und liefern Anregungen für technische Umsetzung, die jedoch kein bloßes Abbild der biologischen Konstruktion, sondern eine Weiterentwicklung und Optimierung anstrebt.

Augen kommen in der Natur in einer Vielzahl von Facetten vor. Selbst Einzeller besitzen Sinneszellen, die Ihnen das Hell-dunkel-Sehen ermöglichen. Erst Weichtiere und Wirbeltiere sowie Gliederfüßer können mit Hilfe ihrer Linsenaugen bzw. Facettenaugen die Welt detaillierter wahrnehmen. Dabei verfügt das Linsenaug über ein größeres **räumliches** Auflösungsvermögen und damit eine größere Sehschärfe. Diese ist bei Facettenaugen durch die Anzahl der Ommatidien (Einzelaugen) begrenzt, jedoch ist eine scharfe Abbildung mit einem Linsenaug nur in der Bildmitte möglich, die Sehschärfe nimmt also zum Rand hin ab. Bei Facettenaugen trägt jedes Einzelaug zur Abbildung bei und verschafft dem

Gliederfüßer ein größeres Blickfeld, aber auch ein Bild, welches sich mosaikartig aus mehreren kleinen zusammensetzt. Darüber hinaus weist es eine höhere zeitliche Auflösung auf, wodurch Gliederfüßer über eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit verfügen.

Die zugrundeliegende Signalverarbeitung der visuellen Reize sowie das Flugverhalten der Tiere kann technisch genutzt werden, um beispielsweise bewegten Robotern eine Orientierungsmöglichkeit zu verschaffen. Bewegungsempfindliche Neurone im Fliegenauge, die für die Verarbeitung der Signale der Ommatidien zuständig sind. Eine Realisierung der Einzelaugen mit lokalen Bewegungsdetektoren (local motion detectors, LMD) eingefügt in einen speziell entwickelten Schaltkreis sorgt für die entsprechende Hinderniserkennung.

Darüber hinaus wurde das Flugverhalten der Fliege analysiert. Es zeigt sich, dass die Fliege zwei verschiedene Flugphasen besitzt. In der einen Phase, der Translationsphase, fliegt die Fliege nahezu geradeaus und bestimmt fortwährend den Abstand zu möglichen Hindernissen. Erst kurz vor einer Kollision ändert die Fliege plötzlich ihre Bewegungsrichtung und weicht dem Objekt aus. Danach folgt wiederum eine Translationsphase. Die Unterbrechungen der Translationsphasen, in denen die Fliege ihre Körperorientierung ändert, heißen Sakkaden. Die Orientierung des Roboters funktioniert dabei auf ähnliche Weise. Hier Wechseln sich ebenfalls Translationsphasen und Sakkaden ab, so dass er sich mit relativ hoher Geschwindigkeit auf ebenen Flächen fortbewegen und jegliche Hindernisse vermeiden kann. Während einer Sakkaden-Phase können keine weiteren optischen Signale verarbeitet werden.

Quelle: *Nachtigall, W.: Bionik. Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 2. Aufl. Seite 257 – 260.*

### **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1 – 3, 5 – 7, 9 – 13: Schumacher, D.; Theyßen, H.: *Physikalisches Praktikum für Mediziner*. Physikalische Grundpraktika, Heinrich Heine Universität Düsseldorf.

Abb. 4: Meyer, Lothar; Schmidt, Gerd-Dietrich: *Physik. Gymnasiale Oberstufe*. DUDEN PAETEC Schulbuchverlag.

Abb. 8: Physikalisches Praktikum für Biologen: *Versuch S Spektralapparate.*, Institut Für Angewandte Physik, TU Braunschweig.

Abb. 14 – 16, 18: eigene Darstellung

Abb. 17: Demtröder, Wolfgang: *Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik*. Springer-Verlag. Seite 278