

Physikalisches Anfängerpraktikum  
an der Universität Konstanz:

**Optische Instrumente**

Experiment durchgeführt am 17.02.2005

Jan Korger, Studiengang Physik-Diplom  
Thomas Wurth, Studiengang Physik-Diplom

## 1 Theorie

### 1.1 Linsen

Optische Linsen bestehen aus einem transparenten Material und haben der Regel kugelförmigen Grenzflächen, an denen das Licht gebrochen wird.

#### 1.1.1 Brechungsgesetz von Snellius

Ein Lichtstrahl wird gebrochen, das heißt er ändert seine Richtung, wenn er von einem transparenten Medium in ein anders übergeht. 1618 stellte Willebrord Snellius erstmals das Brechungsgesetz auf: Es beschreibt den Zusammenhang zwischen den Ausbreitungsgeschwindigkeiten  $c_1$ ,  $c_2$ , die vom Medium abhängen, und dem Ein- bzw. Ausfallswinkel  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  zur Normalen der Grenzfläche hin gemessen. Außerdem ordnet es den Medien spezifische dimensionslose Brechungsindizes  $n_1$ ,  $n_2$  zu, die für den Übergang von Medium 1 zum Medium 2 zur relativen Brechzahl  $n_{1,2}$  zusammengefasst werden können.

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{1,2} \quad (1)$$

Das Medium mit dem größeren Brechungsindex heißt optisch dichter. Vakuum und näherungsweise Luft haben den Brechungsindex  $n_{\text{Vakuum}} = 1$ .

#### 1.1.2 Brechung an einer sphärischen Grenzfläche

Ein Lichtstrahl, der parallel zur Symmetrieachse auf eine sphärische Grenzfläche fällt, wird am Auftreffpunkt gebrochen, pflanzt sich im homogenen Medium jedoch geradlinig fort und schneidet die Symmetrieachse im Brennpunkt.

#### 1.1.3 Sammell- und Zerstreuungslinsen

Linsen, die in der Mitte dicker sind als außen nennt man Sammellinsen, da achsenparallele Strahlen in einem Brennpunkt hinter der Linse gesammelt werden. Hierzu zählen insbesondere bikonvexe Linsen, das heißt Linsen, die nach außen gewölbt sind.

Ist eine Linse in der Mitte dünner als außen spricht man von einer Zerstreuungslinse. Achsenparallele Strahlen werden so gebrochen, als kämen sie von einem gemeinsamen Brennpunkt vor der Linse.

Der Abstand zum Brennpunkt heißt Brennweite  $f$ , bei Sammellinsen ist sie definitionsgemäß positiv, bei Zerstreuungslinsen negativ.

## 1.2 Fernrohre

Fernrohre sind afokale Linsensysteme, d.h. ein einfallendes paralleles Lichtbündel fällt stets wieder parallel aus. (Da Fernrohre zur Beobachtung weit entfernter Objekte verwendet werden, sind die Strahlen von einem Objekt immer näherungsweise parallel.) Ein Fernrohr beeinflusst jedoch Winkel und Dichte des ausfallenden Strahlenbündels. Die Veränderung des Winkels bewirkt die Vergrößerung. Die größere Dichte der Strahlen vergrößert die Helligkeit des Bildes.

Fernrohre haben oft als Objektiv eine Sammellinse, die ein Bild des (im unendlichen angenommenen) Gegenstandes in der Brennebene der Linse erzeugen. Bei größerer Brennweite ist das Bild also wegen  $\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$  und  $f_1 = b$  größer.

### 1.2.1 Gallilei-Fernrohr oder Holländisches Fernrohr

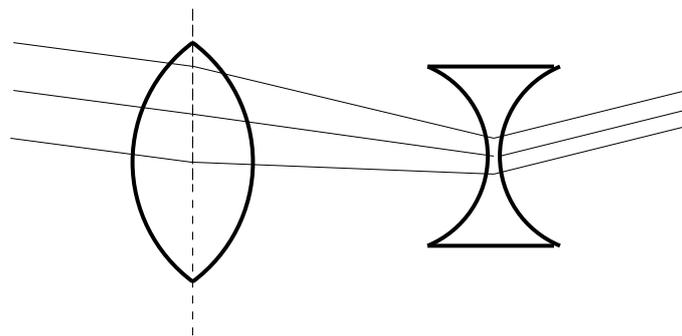


Abbildung 1: Strahlengang beim Gallilei-Fernrohr

Das Gallilei-Fernrohr besteht aus Sammellinse als Objektiv und Zerstreuungslinse als Okular. Der Abstand der beiden Linse ist die Summe der Brennweiten unter Beachtung der Vorzeichenkonvention. Die Gesamtvergrößerung ist

$$v = \frac{f_1}{|f_2|} \quad (2)$$

Es hat ein kleines Gesichtsfeld, stellt Objekte aufrecht und seitenrichtig dar. Das Gallilei-Fernrohr eignet sich daher auch für terrestrische Beobachtungen.

### 1.2.2 Kepler-Fernrohr oder astronomisches Fernrohr

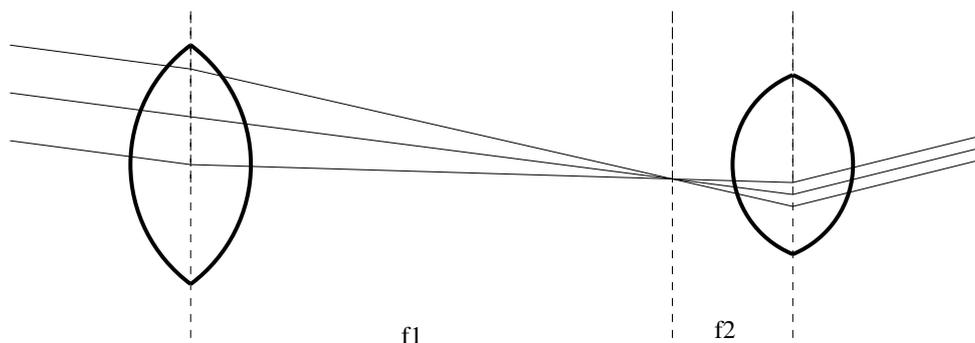


Abbildung 2: Strahlengang beim Kepler-Fernrohr

Das Kepler-Fernrohr verwendet zwei Sammellinsen im Abstand der Summe der beiden Brennweiten. Hierbei entsteht ein um  $180^\circ$  gedrehtes Bild, d.h. seitenverkehrt und auf dem Kopf stehend, was man

natürlich durch weitere Optiken ausgleichen kann. Die Gesamtvergrößerung ist wieder:

$$v = \frac{f_1}{f_2} \quad (3)$$

Das Gesichtsfeld ist bei gleicher Größe des Fernrohres größer als beim Gallilei-Fernrohr.

### 1.2.3 Sehrohr (Periskop)

Unter einem Periskop oder Sehrohr versteht man üblicherweise eine Konstruktion mit Spiegeln oder Prismen, die geeignet ist, um gefahrlos aus einem Bunker oder U-Boot heraus beobachten zu können.

Beste versteht darunter eine Variante des Fernrohres mit einer weiteren Linse, die das Gesichtsfeld des Fernrohres vergrößern soll. Das Gesichtsfeld ist durch die Ränder des Okulars begrenzt. Die zusätzliche Sammellinse wird zwischen Objektiv und Okular, jedoch nahe am Objektiv, angebracht und bricht das Licht so, dass Strahlen, die sonst außerhalb des Gesichtsfelds lägen, das Okular noch erreichen.

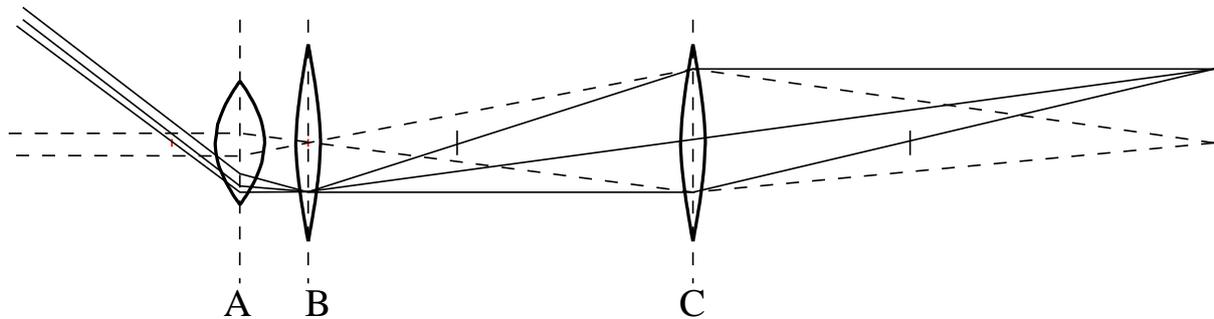


Abbildung 3: Strahlengang beim Sehrohr

### 1.2.4 Auflösungsvermögen

Als Auflösungsvermögen bezeichnet man den kleinsten Winkel (oder dessen Kehrwert), unter dem sich zwei Bildpunkte gerade noch unterscheiden lassen. Punkte erzeugen im Fernrohr Beugungsmuster. Bildpunkte lassen sich dann gerade noch unterscheiden, wenn sich ihre zentralen Beugungsmaxima gerade noch trennen lassen. In der Literatur wird oft als Kriterium für das Auflösungsvermögen gefordert, dass der zweite Bildpunkt gerade auf das erste Minimum des anderen Punktes fällt.

## 1.3 Raumwinkel

Unter einem Raumwinkel versteht man den Quotienten aus dem Flächeninhalt eines Teilstücks einer Kugeloberfläche  $S$  und dem Quadrat des zugehörigen Kugelradius  $R$ :

$$\Omega = \frac{S}{R^2}; \quad [\Omega] = \text{sr} = 1 \quad (4)$$

Die Oberfläche einer abgeschnittenen Kugelkappe ist  $A = 2\pi Rh$ , wobei  $h$  die Distanz zwischen Schnittfläche und Oberfläche der Kugel ist. Ist  $a$  der Abstand zwischen Schnittfläche und dem Mittelpunkt der Kugel, so ist  $h + a$  gleich dem Radius  $R$  der Kugel. Mit der halben Seitenlänge  $b$  der (quadratischen) Schnittfläche erhält man  $R^2 = a^2 + b^2$  und damit:

$$\Omega = \frac{2\pi (\sqrt{a^2 + b^2} - a)}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (5)$$

## 1.4 Wilson'sche Nebelkammer

Die Nebelkammer, benannt nach ihrem Erfinder Charles Thomson Rees Wilson (1869–1959), ist ein Instrument zur Sichtbarmachung geladener Partikel. Es handelt sich um einen zylinderförmigen Behälter, der mit einem unterkühlten, übersättigten Gas gefüllt ist, oft Luft mit Wasserdampf. Seine Wände sind transparent. Im Gas dürfen keine Kondensationskeime wie Staubteilchen vorhanden sein.

Die Übersättigung erreicht man durch schnelle (und daher adiabatische) Expansion des Gases mit einem Kolben. Adiabatisch bedeutet ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung. Daher führt die Expansion zu einer Abkühlung.

Ionisierende Strahlung, d.h. z.B. Alpha-Teilchen, die das Gas durchqueren, erzeugen sichtbare Kondensstreifen, da sie Gasatome ionisieren. Diese Ionen wirken dann als Kondensationskeime.

## 2 Experiment

### 2.1 Fernrohre

#### 2.1.1 Kepler-Fernrohr

Aus den beiden Sammellinsen mit 500 mm bzw. 40 mm Brennweite bauen wir ein Kepler-Fernrohr. Dazu stellen wir die Linsen zunächst im Abstand der Summe der Brennweiten auf, dann suchen wir die Position, in der ein scharfes Bild entsteht: 65.7 cm

Blickt man mit einem Auge durch das Fernrohr, so dass man den Maßstab vergrößert sieht, kann man diesen mit dem unvergrößerten Maßstab, der gleichzeitig mit dem anderen Auge ohne Fernrohr betrachtet wird, vergleichen. Beide Experimentatoren messen stets eine Vergrößerung von  $v = 18 \pm 1$ . Nach (3) erwartet man eine Vergrößerung von  $v = \frac{500 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} = 12.5$ . Unser Wert ist um 44% größer.

#### 2.1.2 Gallilei-Fernrohr

Ersetzt man die Okularlinse durch eine Zerstreuungslinse (hier  $f = -50 \text{ mm}$ ) und passt den Abstand der Linsen an, erhält man ein Gallilei-Fernrohr, dessen Vergrößerung wir zu  $v = 13 \pm 2$  ermitteln. Dies liegt 30% über dem theoretischen Wert von  $v = 10$ . Ein scharfes Bild erhielten wir bei einem Abstand von 55.7 cm.

#### 2.1.3 Fehlerdiskussion

- Im Theorieteil sind wir – wie bei astronomischen Fernrohren stets sinnvoll – von einfallendem parallelem Licht ausgegangen. Das ist bei unseren Fernrohr-ähnlichen Konstruktionen, die eine knapp drei Meter entfernte Skala betrachten keine gute Näherung.

Daher rührt auch der größere Abstand zwischen Okular und Objektiv, was zu einem weiteren Fehler bei der Vergrößerung geführt haben kann.

- Wir kennen die Genauigkeit der angegebenen Brennweiten nicht.
- Es ist schwierig die Genauigkeit des Vergleichs mit beiden Augen festzustellen. Zwar liefert die Methode reproduzierbare Ergebnisse, die Überlagerung der Bilder findet jedoch erst im Gehirn statt, möglicherweise wurden die Daten vorher "optimiert".

### 2.2 Sehrohr

Das Sehrohr nach Bestes Anleitung besteht aus dem Mikroskop-Objektiv A, der 40mm-Feldlinse B und der 500mm-Okularlinse C. Die gemessenen Größen kann man Abbildung 4 entnehmen.

Den Raumwinkel bestimmen wir gemäß (5) zu  $\Omega = 4.3 \text{ sr}$

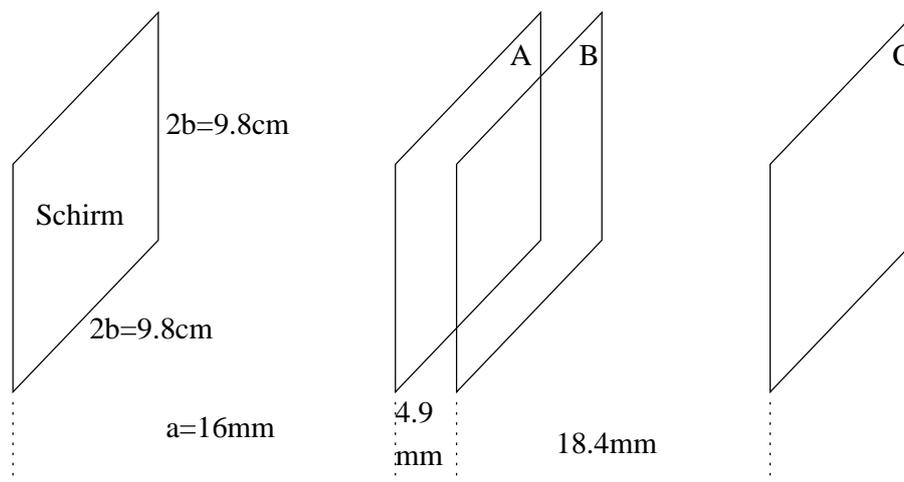


Abbildung 4: Messdaten zum Sehrohr

### 2.3 Nebelkammer

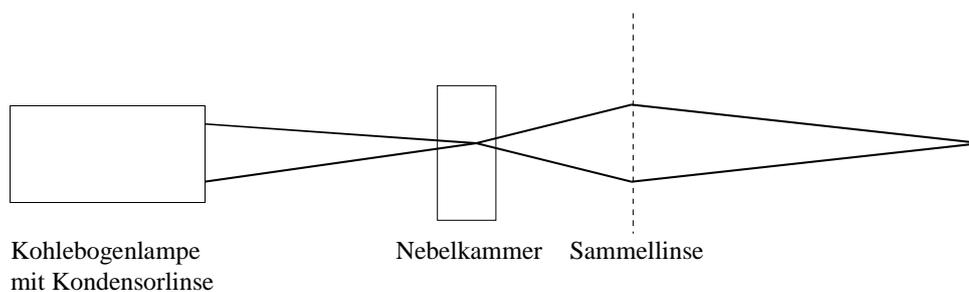


Abbildung 5: Strahlengang bei der Projektion der Nebelkammer

Die Wilsonkammer wird mit der Kohlebogenlampe samt Kondensorlinse beleuchtet und mit Hilfe des dazu vorgesehenen Objektivs scharf auf die Wand abgebildet (siehe Abbildung 5). Zwischen die Alphastrahlenquelle und die das Gehäuse der Nebelkammer legen wir 300 V an, verringern den Druck in der Kammer durch schnelles Ziehen am Kolben und beobachten hübsche Kondensationsspuren.

## 3 Fragen und Aufgaben

### 3.1 Abhängigkeit des Dampfdrucks vom Flüssigkeitströpfchenradius

Die Fragestellung ist wirt, ich vermute folgendes Gedankenexperiment: Eine nichtbenetzende Flüssigkeit (wie Quecksilber) bildet eine ebene Oberfläche. Man bringt eine Kapillare in Kontakt mit der Flüssigkeit und beobachtet den Kapillareffekt, hier Kapillardepression: Am Rand der Kapillare ist der Flüssigkeitspegel niedriger. Innerhalb und außerhalb der Kapillare ist der Luftdruck jedoch gleich, auf Höhe der Flüssigkeitsoberfläche (außerhalb der Kapillare) nehmen wir an:  $p = p_0$

Aus barometrischer Höhenformel und Kapillardepression einer nichtbenetzenden Flüssigkeit (beides nach Beste-Anleitung) erhält man dann für den Druck direkt über der Flüssigkeitsoberfläche am Rand der Kapillare (innerhalb der Kapillare mit Radius  $r$  und den Konstanten molare Masse  $M$ , Gaskonstante  $R$ , Temperatur  $T$ , Dichte  $\rho$  und Oberflächenspannung  $\sigma$ ):

$$p = p_0 \exp\left(\frac{-Mg}{RT} \cdot \frac{-2\sigma}{\rho gr}\right) = p_0 \exp\left(\frac{2M\sigma}{RT\rho R}\right) \quad (6)$$

Dies entspricht dem Dampfdruck eines Tröpfchens mit Radius  $r$ .

### 3.2 Adiabaten- oder Poisson-Gleichung

Der Energieerhaltungssatz lautet in der thermodynamischen Formulierung

$$dU = \partial Q + \partial W \quad (7)$$

$$\iff c_V dT = c_P dT - p dV \quad (8)$$

mit den molaren Wärmekapazitäten bei konstantem Volumen  $c_V$  bzw. bei konstantem Druck  $c_P > c_V$ . Daraus erhält man mit dem idealen Gasgesetz

$$pV = RT \quad (9)$$

(wobei extensive Größen, hier  $V$ , als molare Größen, d.h. bezogen auf ein 1 mol zu lesen sind;  $R = k_B N_A$  nennt man universelle Gaskonstante) folgende Beziehung:

$$c_V dT = c_P dT - R dT \quad (10)$$

$$\iff c_P = c_V + R \quad (11)$$

Aus der kinetischen Gastheorie kennen wir  $c_V = \frac{f}{2}R$  mit der Anzahl der Freiheitsgrade  $f$  und erhalten:

$$c_P = \frac{f+2}{2}R \implies \kappa := \frac{c_P}{c_V} = \frac{f+2}{f} = 1 + \frac{2}{f} \quad (12)$$

Auf der Adiabaten ( $\partial Q = 0$ ) gilt nach (8) mit (9):

$$c_V dT = -p dV$$

$$\iff c_V dT = -\frac{RT}{V} dV$$

$$\iff c_V \frac{1}{T} dT = -R \frac{1}{V} dV$$

$$[\text{integrieren}] \iff \frac{f}{2} \ln T = -\ln V + \text{const}$$

$$\iff T^{(\frac{f}{2})} V = \text{const}$$

$$\iff TV^{(\frac{2}{f})} = \text{const} \quad \text{mit: } \frac{2}{f} = 1 - \kappa$$

### 3.3 Nebelbildung ohne Kondensationskeime

Ab einer achtfachen Flüssigkeitsübersättigung ist der Dampfdruck so groß, dass die Flüssigkeit bereits an einem Minimaltröpfchen (aus wenigen Molekülen, die per Zufall am selben Ort sind) kondensiert. Es bildet sich ein Nebel, der die ganze Kammer ausfüllt.

## A Literatur

- Dieter Meschede: Gerthsen – Physik  
21. Auflage, 2002, Springer
- Wikipedia, die freie Enzyklopädie  
<http://de.wikipedia.org>
- Beste: Versuchsanleitungen zum physikalischen Anfängerpraktikum  
1994