

Versuch 15A

Geometrische Optik und optische Instrumente

Sascha Hankele
sascha@hankele.com

Kathrin Alpert
kathrin.alpert@uni-ulm.de

durchgeführt am 20. April 2007

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	4
1.1	Gültigkeitsbereich und Axiome	4
1.2	Geometrischer und optischer Lichtweg	4
1.3	Fermatsches Prinzip	4
1.3.1	Reflexionsgesetz	4
1.3.2	Brechungsgesetz	5
1.4	Linsen	5
1.4.1	Abbildungsgleichung	5
1.4.2	Sammel- und Zerstreulinsen	6
1.5	Brennweitenbestimmung	6
1.5.1	Autokollimation	6
1.5.2	Besselverfahren	7
1.6	Linsensysteme	8
1.7	Spezielle Linsensysteme	9
1.7.1	Lupe	9
1.7.2	Mikroskop	9
1.7.3	Fernrohr	10
1.8	Strahlaufweitungsoptik	11
2	Versuchsbeschreibung	12
2.1	Bestimmung der Brennweiten verschiedener Linsen	12
2.2	Mikroskop	12
2.3	Fernrohr	13
2.4	Kollimatorsystem	13

3	Versuchsauswertung	14
3.1	Bestimmung der Brennweiten verschiedener Linsen	14
3.1.1	Autokollimation	14
3.1.2	Besselverfahren	15
3.2	Mikroskop	15
3.3	Fernrohr	16
3.4	Kollimatorsystem	16
3.4.1	Ohne vorgesetzte Sammellinse	17
3.4.2	Mit vorgesetzter Sammellinse	17

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Gültigkeitsbereich und Axiome

Die geometrische Optik wird auch als Strahlenoptik bezeichnet. Die Lichtstrahlen laufen parallel zur Ausbreitungsrichtung der Lichtwellen. Das Verhalten des Lichts in der geometrischen Optik hängt nicht mit seinem Wellencharakter zusammen. Daraus folgt, dass Phänomene wie Beugung und Interferenz nicht auftreten, da diese nur mit dem Wellencharakter des Lichts zu erklären sind. Dies ist dann der Fall, wenn die Wellenlänge des verwendeten Lichts sehr viel kleiner ist als die Abmessungen der Körper, mit denen das Licht wechselwirkt (Blenden, Spalte etc.).

Die Axiome der geometrischen Optik lauten:

- Lichtstrahlen breiten sich geradlinig aus
- Lichtstrahlen durchdringen einander unbehindert
- Beugungseffekte treten nicht auf
- Der Lichtweg ist umkehrbar

1.2 Geometrischer und optischer Lichtweg

Bewegt sich ein Lichtstrahl im Vakuum, so ist der optische Lichtweg gleich dem Geometrischen, da der Brechungsindex des Vakuums gleich Eins ist. In allen anderen Medien ist der Brechungsindex größer und damit die Lichtgeschwindigkeit kleiner. Der optische Lichtweg ist der Weg, den das Licht in der gleichen Zeit im Vakuum zurücklegen würde. In einem Medium mit dem Brechungsindex n hängen s_g und s_o also folgendermaßen zusammen:

$$s_o = ns_g$$

1.3 Fermatsches Prinzip

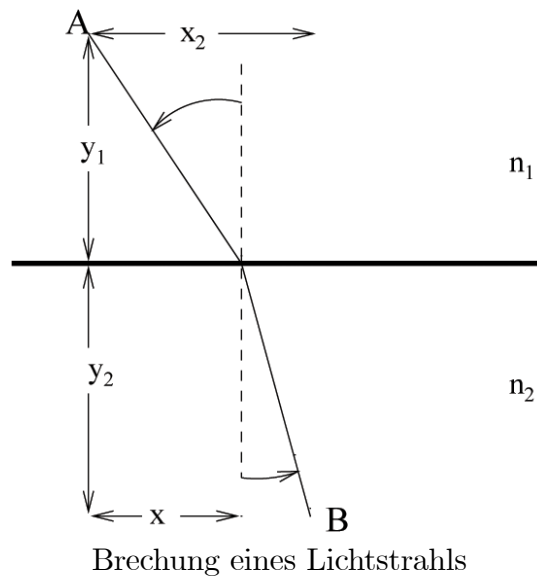
Das Fermatsche Prinzip besagt, dass sich Lichtstrahlen so ausbreiten, dass der zurückgelegte Weg minimal wird. Aus dem Fermatschen Prinzip folgt sofort das erste Axiom, da eine Gerade die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten darstellt. Desweiteren folgen das Reflexions- und das Brechungsgesetz aus dem Fermatschen Prinzip:

1.3.1 Reflexionsgesetz

Das Reflexionsgesetz besagt, dass der Winkel zwischen dem reflektierten Lichtstrahl und dem Einfallslot gleich dem Winkel zwischen einfallendem Strahl und Einfallslot ist. Des-

weiteren liegt der reflektierte Strahl in der Einfallsebene, der Ebene, die von einfallendem Strahl und Einfallslot aufgespannt wird.

1.3.2 Brechungsgesetz



Der Weg zwischen den Punkten A und B hat die folgende Länge:

$$l = n_1 \sqrt{x^2 + y_1^2} + n_2 \sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}$$

Nach dem Fermatschen Prinzip muss gelten:

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dx} &= 0 \\ \Rightarrow 0 &= n_1 \frac{x}{\sqrt{x^2 + y_1^2}} - n_2 \frac{x_2 - x}{\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}} \\ &\Rightarrow n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \end{aligned}$$

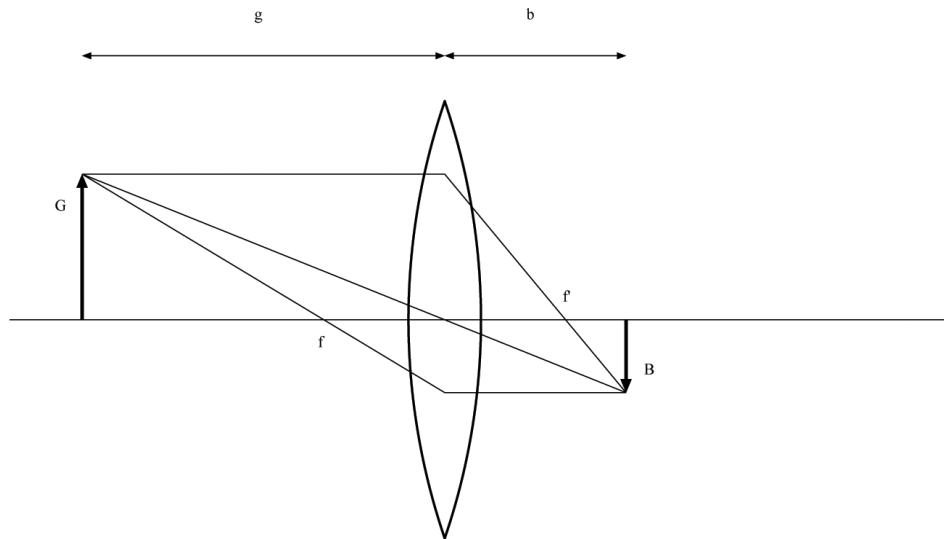
1.4 Linsen

1.4.1 Abbildungsgleichung

Aus der Abbildungsgleichung

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \Rightarrow f = \frac{g \cdot b}{g + b} \quad (1)$$

kann man durch Messung der Bildweite b und der Gegenstandsweite g die Brennweite f einer Linse bestimmen. Dabei muss der Gegenstand scharf auf dem Schirm abgebildet werden.



Strahlengang einer Linse

1.4.2 Sammel- und Zerstreuungslinsen

Ein parallel einfallendes Lichtbündel wird von einer Sammellinse konvergent und von einer Zerstreuungslinse divergent gemacht. Bikonvexlinsen sind z.B. Sammellinsen, Bikonkavlinen dagegen Zerstreuungslinsen. Bei Zerstreuungslinsen liegt der bildseitige Brennpunkt F' auf der Gegenstandsseite, F dafür auf der Bildseite. Benutzt man die DIN Norm 35, nach der alle Größen links von der Linse negativ angegeben werden, so hat eine Zerstreuungslinse eine negative Brennweite.

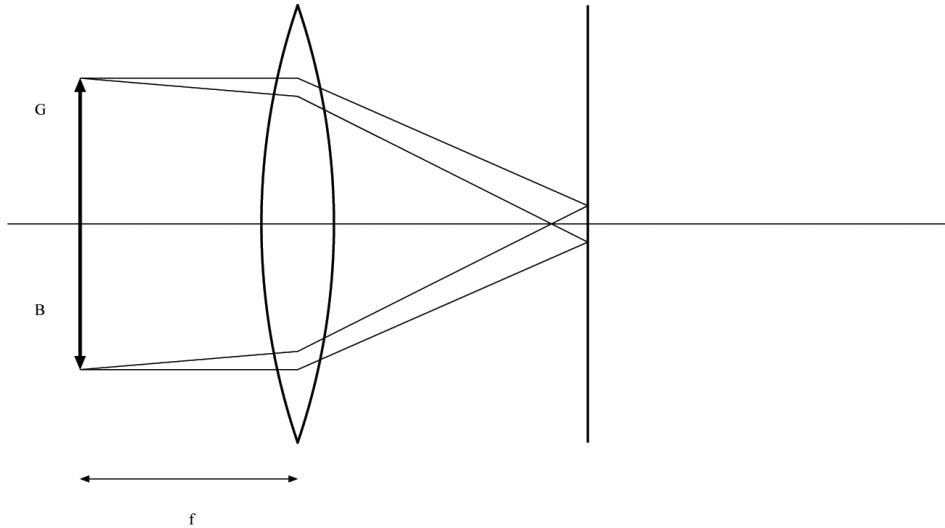
1.5 Brennweitenbestimmung

Neben der Bestimmung der Brennweite mit der Abbildungsgleichung gibt es weitere Verfahren:

1.5.1 Autokollimation

Bei diesem Verfahren wird der Gegenstand so lange verschoben bis sich ein scharfes Bild in der Gegenstandsebene bildet. Dann befindet sich der Gegenstand in der Brennebene.

Aus der Abbildungsgleichung erhält man für $g = f$ parallele Strahlen hinter der Linse, diese werden am Spiegel reflektiert und nach einem nochmaligen Durchgang durch die Linse in der Brennebene fokussiert, da sie parallel sind ($g' = \infty$).



Autokollimation

1.5.2 Besselverfahren

Bei diesem Verfahren zur Bestimmung der Brennweite von einer Linse benutzt man den Umstand, dass der Strahlengang des Lichts umkehrbar ist. Bei einem festen Abstand $\geq 4f$ zwischen Gegenstand und Schirm gibt es also zwei Positionen für die Linse, mit denen das Bild auf dem Schirm scharf wird. Sei l der Abstand des Gegenstands vom Schirm, dann gilt

$$l = h + b + g \quad (2)$$

wobei h der Abstand der Hauptebenen bei dicken Linsen ist. Ausserdem gilt natürlich die Abbildungsgleichung (Gl. (1)). Setzt man beide Gleichungen ineinander ein, folgt

$$g^2 - g(l - h) + f(l - h) = 0 \quad (3)$$

Für g folgt hieraus

$$g_{1/2} = \frac{l - h}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{l - h}{2}\right)^2 - f(l - h)} \quad (4)$$

Sei nun $d = g_1 - g_2$ dann gilt für d

$$d = \sqrt{l^2 - 2lh + h^2 - 4fl + 4fh} \quad (5)$$

und somit für die Brennweite

$$f = \frac{1}{4} \left(l - h - \frac{d^2}{l - h} \right) \quad (6)$$

Man muss jetzt nur den Abstand d zwischen den zwei Positionen der Linse die ein scharfes Bild ergeben kennen um die Brennweite zu bestimmen. Da es sich nur um eine Messung handelt, ist der Fehler natürlich geringer, als wenn man Gegenstandsweite und Bildweite extra vermisst.

1.6 Linsensysteme

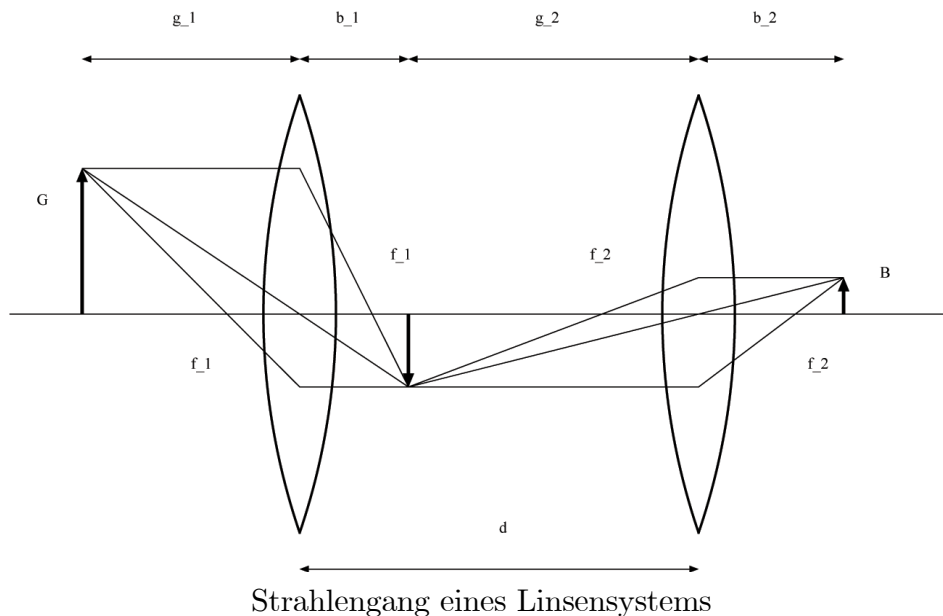
Auch bei einem Linsensystem gilt die Abbildungsgleichung. Die Gegenstandsweite bzw. die Bildweite werden dabei von der ersten bzw. der letzten Linse ab gemessen. Man kann die Gesamtbrennweite des Systems für jede beliebige Anzahl von Linsen leicht durch die Matrizenoptik bestimmen. In unserem Versuch handelte es sich immer um zwei Linsen der Brennweite f_1 und f_2 . Dann ergibt sich

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_1} - \frac{d}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d}{f_2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

bzw. für die Gesamtbrennweite

$$f = c_{21} = \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_1} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (8)$$

falls der Abstand der beiden Linsen voneinander d betrug.

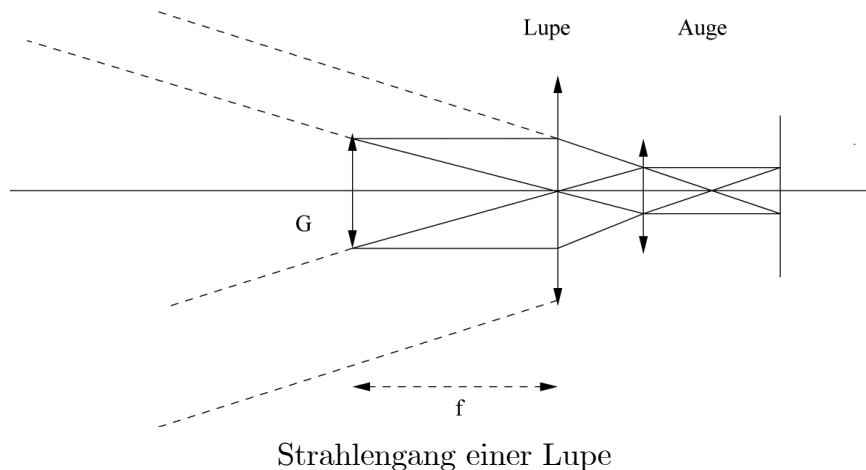


1.7 Spezielle Linsensysteme

1.7.1 Lupe

Eine Lupe ist eine Sammellinse kurzer Brennweite, die so zwischen Auge und Objekt gehalten wird, dass das Objekt in der Brennweite der Linse liegt. Dadurch gelangt paralleles Licht ins Auge und der Gegenstand scheint im Unendlichen zu liegen. Das Auge muss deshalb nicht akkomodieren. Das heißt entspanntes Sehen ist möglich. Außerdem vergrößert die Lupe den Sehwinkel: Für das Auge erscheint das von der Lupe erzeugte virtuelle Bild unter dem Winkel $\alpha = G/f$. Ohne Lupe erschiene der Gegenstand in der deutlichen Sehweite unter dem Winkel $\alpha_0 = G/s_0$. Die Winkelvergrößerung beträgt also

$$V_L = \frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{s_0}{f} \quad (9)$$



1.7.2 Mikroskop

Eine wesentlich höhere Vergrößerung erreicht man mit dem Mikroskop, das prinzipiell aus zwei Linsen besteht. Die erste Linse (Objektiv) entwirft ein reelles Zwischenbild des Gegenstands in der Brennebene der zweiten Linse (Okular). Ins Auge gelangen dann wieder parallele Strahlenbündel von jedem Punkt des Gegenstands, so dass es ihn im Unendlichen wahrnimmt. Aus der Abbildungsgleichung (1) folgt unmittelbar

$$b = \frac{gf_1}{g - f_1} \quad (10)$$

Das Okular wirkt als Lupe für das Zwischenbild. Es gilt:

$$\tan \alpha = \frac{D_1}{f_2} = \frac{D_0 b}{g f_2} \quad (11)$$

Ohne Mikroskop wäre das Objekt unter dem Winkel

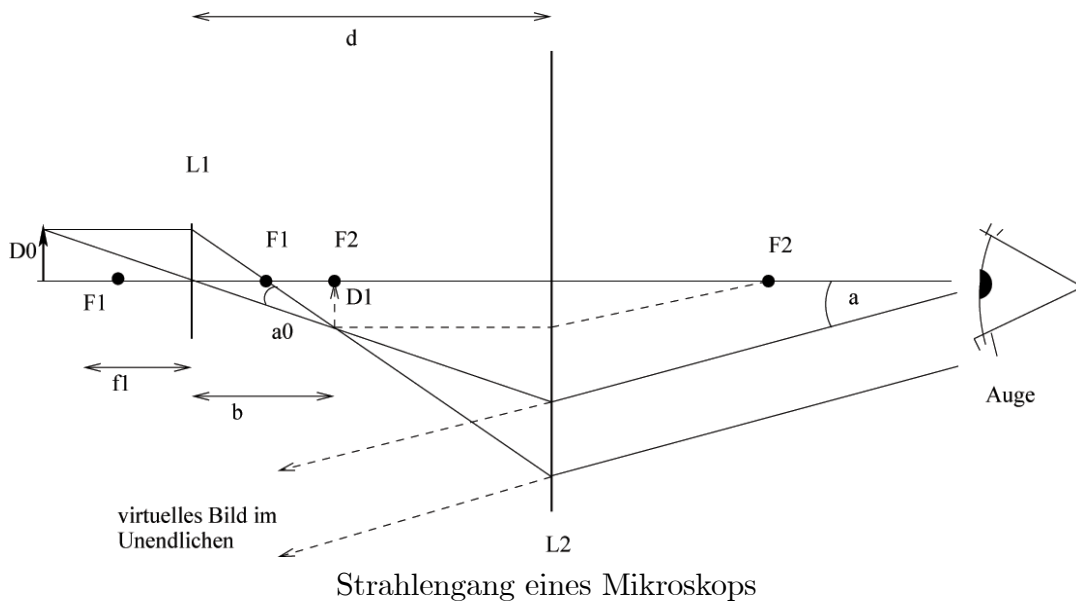
$$\tan \alpha_0 = \frac{D_0}{s_0} \quad (12)$$

zu sehen. Die Vergrößerung beträgt also

$$V_M = \frac{D_0 b s_0}{D_0 g f_2} = \frac{b s_0}{g f_2} \quad (13)$$

Setzt man die Tubuslänge t als Abstand der Brennweiten, so kann man auch näherungsweise ($g \approx f_1$, $b \approx t$) mit folgender Formel rechnen:

$$V_M = \frac{t s_0}{f_1 f_2} \quad (14)$$



1.7.3 Fernrohr

Das Kepler'sche Fernrohr besteht analog zum Mikroskop aus einem System von zwei Sammellinsen. Hier hat jedoch L_1 eine sehr große Brennweite f_1 . Die Linse L_1 erzeugt ein reelles Zwischenbild eines unendlich weit entfernten Objekts, das dann mit der als Lupe wirkenden

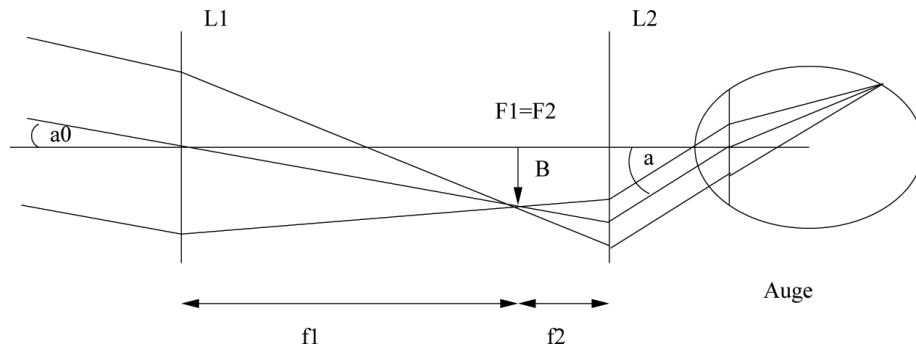


Abbildung 1: Strahlengang eines Fernrohrs

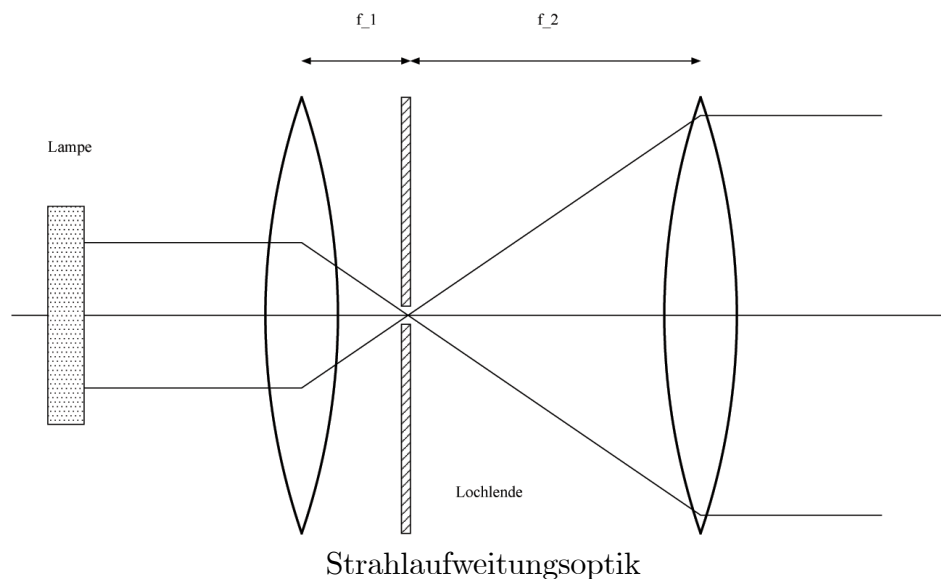
Linse L_2 vergrößert wird. Das Fernrohr wird so konstruiert, dass die Brennebenen der beiden Linsen sich am selben Ort befinden. Dort entsteht auch das Zwischenbild. Der Winkel α_0 ist dann der Winkel zwischen den Strahlen von gegenüberliegenden Randpunkten des Objektes. Mit $\alpha = B/f_2$ erhalten wir daher für die Winkelvergrößerung des Fernrohrs:

$$V_F = \frac{B}{f_2 \alpha_0} = \frac{f_1 \alpha_0}{f_2 \alpha_0} = \frac{f_1}{f_2} \quad (15)$$

1.8 Strahlaufweitungsoptik

Bei einem Linsensystem mit zwei Sammellinsen, bei denen die Brennpunkte zwischen den Linsen zusammenfallen, wird der Strahl aufgeweitet, wenn die erste Brennweite kleiner als die zweite Brennweite ist (Strahlensatz). Um zu gewährleisten, dass in die Aufweitungslinse nur Licht aus dem Brennpunkt fällt, setzt man eine Lochblende in die Brennebene der zweiten Linse. Damit liegt quasi eine punktförmige Lichtquelle vor. Die erste Linse ist dann nicht mehr unbedingt nötig. Aus dem Strahlensatz und den trigonometrischen Formeln folgt für den Öffnungswinkel des Lichtkegels

$$\varphi = \arctan \left(\frac{d_2 - d_1}{2(l_2 - l_1)} \right)$$



2 Versuchsbeschreibung

2.1 Bestimmung der Brennweiten verschiedener Linsen

Der Versuchsaufbau ist bei allen durchgeführten Verfahren derselbe. Eine Lichtquelle ist fest auf der linken Seite der optischen Bank montiert. Als Gegenstand verwendeten wir eine F-Blende kombiniert mit einer Mattscheibe. Dem Gegenstand folgt eine Linse, bzw. ein Linsensystem und schließlich der Schirm. Bei der Autokollimation wird der Schirm durch einen Spiegel ersetzt.

2.2 Mikroskop

Aus zwei Sammellinsen wird auf der optischen Bank ein Mikroskop aufgebaut. Mit Hilfe zweier in Glas geätzter Skalen lässt sich die Vergrößerung des Objektivs bestimmen, indem die erste Skala als Objekt dient und die Zweite skala in die Brennebene des Okulars gelegt wird. Durch Vergleich beider Skalen erhält man die Vergrößerung des Objektivs. Zur berechnung werden folgende Formeln verwendet, wobei der theoretische mit dem gemessenen Wert verglichen wird.

$$V_{Obj,ber} = \frac{t}{f_{Obj}}$$

$$\Delta V_{Obj,ber} = \sqrt{\left(\frac{1}{f_{Obj}} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{t}{f_{Obj}^2} \Delta f_{Obj}\right)^2}$$

$$V_{Obj,gem} = \frac{\text{gro\ss e Skt}}{\text{kleine Skt}} = \frac{a}{b}$$

$$\Delta V_{Obj,gem} = \sqrt{\left(\frac{1}{b}\Delta a\right)^2 + \left(\frac{a}{b^2}\Delta b\right)^2}$$

Um die Gesamtvergrößerung zu bestimmen entfernt man nun die zweite Skala innerhalb des Mikroskops. Als Vergleichsmaß dient nun ein Lineal, wobei das eine Auge durch das Mikroskop sieht und das andere Auge auf das Lineal. Da die kleine Skala 200Skt/cm aufweist ist ein Vergleich mit dem Lineal möglich und es ergeben sich folgende Formeln:

$$V_{ges,ber} = \frac{t \cdot s}{f_{Obj} \cdot f_{Ok}}$$

$$\Delta V_{ges,ber} = \sqrt{\left(\frac{s}{f_{Obj} \cdot f_{Ok}}\Delta t\right)^2 + \left(\frac{t}{f_{Obj} \cdot f_{Ok}}\Delta s\right)^2 + \left(\frac{t \cdot s}{f_{Obj}^2 \cdot f_{Ok}}\Delta f_{Obj}\right)^2 + \left(\frac{t \cdot s}{f_{Obj} \cdot f_{Ok}^2}\Delta f_{Ok}\right)^2}$$

$$V_{ges,gem} = 20 \cdot \frac{a}{b}$$

$$\Delta V_{ges,gem} = \sqrt{\left(20\frac{1}{b}\Delta a\right)^2 + \left(20\frac{a}{b^2}\Delta b\right)^2}$$

2.3 Fernrohr

Aus einem System von 2 Sammellinsen mit den Brennweiten f_1 und f_2 mit Abstand d wurde ein Fernrohr gebaut, wobei d gerade die Summe der beiden Brennweiten ist, so dass beide Brennebenen innerhalb des Fernrohrs zusammenfallen.

2.4 Kollimatorsystem

Der Aufbau entspricht dem in der Abbildung 'Strahlenaufweitungsoptik'. Zunächst wird jedoch die vorgesetzte Sammellinse weggelassen um einen möglichst einfach Aufbau zu erhalten. Der Durchmesser des Lichtkegels, welcher auf den Schirm projiziert wird, wird an zwei Positionen gemessen. Damit lässt sich der Öffnungswinkel des Kegels berechnen.

Zur Verbesserung der Parallelität der Lichtstrahlen wird eine Sammellinse vor die Blende gesetzt. Zur weiteren Optimierung des Aufbaus wird in einem dritten Versuch eine weitere Blende mit etwas größerer Öffnung vor die Lampe gestellt um Streulicht zu vermeiden. Insgesamt soll dabei eine möglichst punktförmige Lichtquelle bei der zweiten Blende erreicht werden.

3 Versuchsauswertung

3.1 Bestimmung der Brennweiten verschiedener Linsen

Für zwei Linsen unterschiedlicher Brennweite wurde mit zwei Methoden die Brennweite bestimmt. Die Abstände wurden direkt mit einem Lineal gemessen und nicht über die Bank abgelesen, da uns dies genauer erschien. Von der Messung einer Konkaven Linse in Kombination einer Konvexen Linse wurde abgesehen, da mit beiden Verfahren kein Bild zu erzeugen war.

3.1.1 Autokollimation

Bei jeder Linse wurden zwei Messungen vorgenommen.

(i) **Erste Linse: Brennweite 100 mm** Die 'F'-Blende wird bei einem Abstand von

$$s_1 = 104\text{mm} \pm 3\text{mm} \quad s_2 = 103\text{mm} \pm 3\text{mm}$$

zum Spiegel wieder scharf auf die Blende zurückabbildet. Als Brennweite folgt:

$$f_{A,1} = 103,5\text{mm} \pm 3\text{mm}$$

(ii) **Zweite Linse: Brennweite 150 mm** Die 'F'-Blende wird bei einem Abstand von

$$s_1 = 153\text{mm} \pm 3\text{mm} \quad s_2 = 152\text{mm} \pm 3\text{mm}$$

zum Spiegel wieder scharf auf die Blende zurückabbildet. Als Brennweite folgt:

$$f_{A,2} = 152,5\text{mm} \pm 3\text{mm}$$

Fehlerbetrachtung Die Messung der Linse mit 150 mm Brennweite liegt im Rahmen der Messungenauigkeit. Für die 100 mm Linse wurde ein etwas zu großer Wert ermittelt. Die Ursache kann ein etwas schief eingestellter Spiegel sein. Auch die Einstellung des Scharfpunktes ermöglicht einen gewissen Spielraum, der nicht in die Messungenauigkeit mit eingeflossen ist. Insgesamt sind die Ergebnisse sehr zufriedenstellend unter Anbetracht der einfachen Methode.

3.1.2 Besselverfahren

(i) **Erste Linse: 100 mm** Der Abstand des Schirms zur 'F'-Blende beträgt $l = 69,2\text{cm} \pm 0,3\text{cm}$. Die Scharfpositionen wurden jeweils zwei mal gemessen. Durch Mittelwertbildung erhält man für die erste Linsenposition $s_1 = 12,15\text{cm} \pm 0,3\text{cm}$. Auch bei $s_2 = 57,25\text{cm} \pm 0,3\text{cm}$ entsteht ein scharfes Bild. Mit $d = s_2 - s_1 = 45,1\text{cm} \pm 0,3\text{cm}$, ergibt sich:

$$f_{B,1} = 99,52\text{mm} \pm 4,49\text{mm}$$

(ii) **Zweite Linse: 150 mm** Der Abstand des Schirms zur 'F'-Blende beträgt $l = 100,0\text{cm} \pm 0,3\text{cm}$. Die Scharfpositionen wurden jeweils zwei mal gemessen. Durch Mittelwertbildung erhält man für die erste Linsenposition $s_1 = 18,15\text{cm} \pm 0,3\text{cm}$. Auch bei $s_2 = 82,35\text{cm} \pm 0,3\text{cm}$ entsteht ein scharfes Bild. Mit $d = s_2 - s_1 = 64,2\text{cm} \pm 0,3\text{cm}$,

ergibt sich:

$$f_{B,1} = 146,96\text{mm} \pm 4,50\text{mm}$$

Fehlerbetrachtung Die Ergebnisse beider Linsen liegen im Rahmen des Fehlers. Problematisch beim Besselverfahren ist auch wieder, die exakte Position für ein scharfes Bild zu ermitteln. Die Einstellung des Scharfpunktes ist abhängig vom 'Augenmaß' des Praktikanten. Der Fehler wurde mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet.

3.2 Mikroskop

Das Mikroskop wurde mit einer Objektivlinse der Brennweite 25 mm und einer Okularlinse der Brennweite 20 mm aufgebaut. Ausgegangen wird dabei von einer maximalen Abweichung der Herstellerangaben um 0,5 mm. Bei der Tubuslänge handelt es sich um den Abstand der beiden Brennpunkte. Vom Abstand d der Linsen wurden beide Brennweiten subtrahiert. Für die Tubuslänge gilt also: $t = d - f_{Obj} - f_{Ok}$

(i) **Vergrößerung der Objektivlinse** Zur Berechnung wurden die Formeln aus der Versuchsbeschreibung verwendet:

#	t/mm	f_{Obj}/mm	f_{Ok}/mm	$V_{Obj,gem}$	$\Delta V_{Obj,gem}$	$V_{Obj,ber}$	$\Delta V_{Obj,ber}$	$\frac{V_{gem}}{V_{ber}}$
1	100 ± 2	25	20	4,00	0,27	4,00	0,11	1,000
2	79 ± 2	25	20	3,00	0,21	3,16	0,10	0,949
3	53 ± 2	25	20	2,17	0,08	2,12	0,09	1,024

(ii) Gesamtvergrößerung Bei einer Tubuslänge $t = 5,2\text{cm} \pm 0,2\text{cm}$ und einer gemessenen deutlichen Sehweite von $s = 20,0\text{cm} \pm 0,5\text{cm}$ wurde die Vergrößerung mit Hilfe eines Lineals abgelesen. Dabei wurde für die Skala im Mikroskop $a=1\text{Skt} \pm 0,1\text{Skt}$ pro $b=1\text{Skt} \pm 0,1\text{Skt}$ des Lineals abgelesen. Mit den Formeln aus der Versuchsbeschreibung erhält man für die Gesamtvergrößerung:

$$V_{ges,ber} = 20,8 \pm 1,16$$

$$V_{ges,gem} = 20 \pm 2,83$$

Der gemessene Wert weicht vom berechneten Wert um 3,85% ab.

Fehlerbetrachtung Bei der Bestimmung der Objektivvergrößerung stimmen die berechneten Werte recht gut mit den abgelesenen Werten überein. Als schwierig erwies sich bei diesem Teil die korrekte Scharfstellung der beiden Skalen innerhalb des Mikroskops. Auch die Bestimmung der Tubuslänge ist problematisch, da die genaue Position der Linsen innerhalb der Halterung nicht gemessen werden kann. Bei der Gesamtvergrößerung stimmt der berechnete und der abgelesene Wert gut überein.

3.3 Fernrohr

Beim Fernrohr wurde als Okular eine Linse der Brennweite 20 mm genommen - als Objektiv eine Linse mit 100 mm Brennweite. Die maximale Abweichung von den Herstellerangaben werden mit 0,5 mm angenommen.

Durch gleichzeitiges Betrachten einer Skala mit Fernrohr am einen Auge und ohne Fernrohr mit dem anderen Auge, können die Skalenteile miteinander verglichen werden. $4\text{Skt} \pm 0,2\text{Skt}$ auf der Skala mit Fernrohr entsprachen $20\text{Skt} \pm 1\text{Skt}$ auf der Skala ohne Hilfsmittel. Damit erhält man:

$$V_{F,exp} = 5,00 \pm 0,255$$

$$V_{F,ber} = 5,00 \pm 0,127$$

Fehlerbetrachtung Die ungewohnte Aufgabe mit beiden Augen gleichzeitig unterschiedliche Skalen zu sehen führt schnell zu einem Ablesefehler. Vergleicht man den theoretischen mit dem experimentellen Wert, so ist die Messung sehr zufriedenstellend. Die Fehler wurden mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet.

3.4 Kollimatorsystem

Bei allen Versuchen wurde eine Blende mit Radius 1,25mm verwendet.

3.4.1 Ohne vorgesetzte Sammellinse

Zur Berechnung des Öffnungswinkels wurde der Schirm an zwei Positionen geschoben. An beiden Stellen wurde der Durchmesser d des Lichtkegels gemessen:

Position	l/cm	d/cm
1	$40,0 \pm 0,3$	$1,7 \pm 0,2$
2	$80,0 \pm 0,3$	$3,5 \pm 0,2$

Damit ergibt sich für den Öffnungswinkel:

$$\alpha = 1,289^\circ \pm 0,203^\circ$$

3.4.2 Mit vorgesetzter Sammellinse

(i) **ohne zusätzliche Lochblende** Zur Verbesserung der Punktlichtquelle wurde eine zusätzliche Sammellinse vor die Lochblende gestellt, deren Brennebene identisch mit der Blende war.

Zur Berechnung des Öffnungswinkels wurde der Schirm an zwei Positionen geschoben. An beiden Stellen wurde der Durchmesser d des Lichtkegels gemessen:

Position	l/cm	d/cm
1	$100,0 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,2$
2	$50,0 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,2$

Damit ergibt sich für den Öffnungswinkel:

$$\alpha = 0,516^\circ \pm 0,162^\circ$$

(ii) **mit zusätzlicher Lochblende** Um Streulicht aus der Lampe zu vermeiden wurde direkt vor die Lampe eine weitere Blende mit etwas größerer Öffnung gestellt. Sonst ist der Aufbau identisch zu (i).

Zur Berechnung des Öffnungswinkels wurde der Schirm an zwei Positionen geschoben. An beiden Stellen wurde der Durchmesser d des Lichtkegels gemessen:

Position	l/cm	d/cm
1	$32,7 \pm 0,3$	$4,0 \pm 0,2$
2	$89,9 \pm 0,3$	$4,5 \pm 0,2$

Damit ergibt sich für den Öffnungswinkel:

$$\alpha = 0,250^\circ \pm 0,142^\circ$$

Fehlerbetrachtung Wichtig ist zunächst, dass alle Objekte auf gleicher Höhe angebracht werden, was sich auf Grund der unterschiedlichen Halterungen nicht immer einfach gestaltet. Zur Erzeugung des parallelen Licht auf diese Art und Weise ist es sehr wichtig, dass sich vor der Sammellinse eine punktförmige Lichtquelle befindet. Mit einer zusätzlichen Sammellinse vor der Blende wird eine deutliche Verbesserung erreicht. Eine weitere Verbesserung der Parallelität tritt ein, wenn eine weitere Blende vor die Lampe gestellt wird. Die Fehler wurden mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet.

Quellen

[1] W. Demtröder, Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik, Axel Springer Verlag, 2006

[2] W. Walcher, Praktikum der Physik, Stuttgart, 1989

[3] David R. Lide , CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84. Auflage, 2003

[4] J. Krause, J. Grehn, Metzler Physik, Schroedel Verlag GmbH, Hannover 2004

Anmerkung: Alle Vergleichswerte stammen von [3]