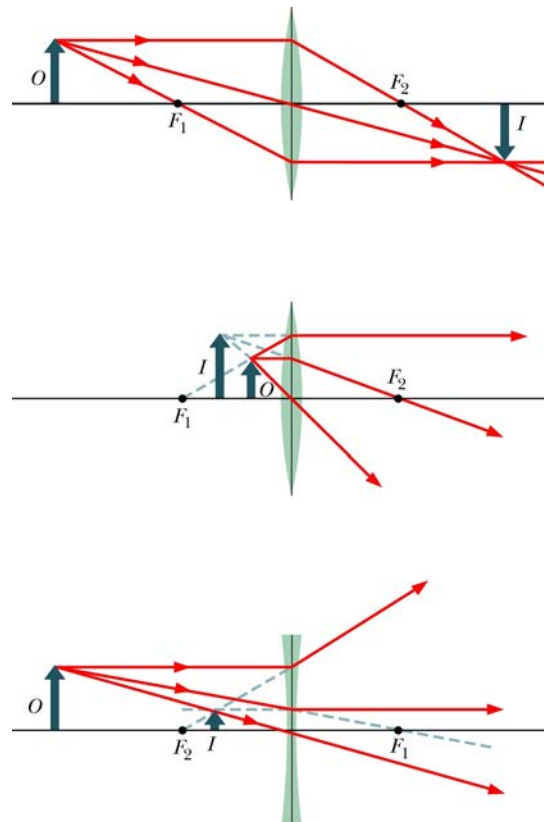
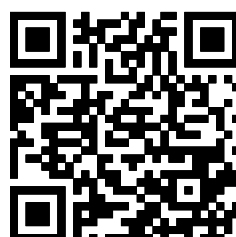


Physikalisches Grundpraktikum

Geometrische Optik



Grundpraktikum Physik: <http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/>



Ziel des Versuchs

In der geometrischen Optik wird die Wellennatur des Lichtes vernachlässigt und von der Annahme ausgegangen, dass sich Lichtstrahlen geradlinig ausbreiten. Der Verlauf von Lichtstrahlen in einem optischen System wird durch die Reflexions- und Brechungsgesetze festgelegt. Diese Gesetze werden auf einzelne Linsen und Linsensysteme (Objektiv, Mikroskop) angewendet.

1. Fragen

1. Erklären Sie das Fermatsche Prinzip.
2. Was versteht man unter dem Huygensschen Prinzip?
3. Erklären Sie die Lichtbrechung an einer Grenzfläche mit dem Huygensschen Prinzip.
4. Wie lautet die Abbildungsgleichung? Wie konstruiert man bei dünnen Linsen einen Strahlengang
5. Wie sind die Hauptebenen eines Linsensystems definiert?
6. Zeichnen Sie den abbildenden Strahlengang und den Bündelstrahlengang in einem Mikroskop. Geben Sie die Größenordnung der üblicherweise verwendeten Brennweiten an.
7. Wie sind Gesamtvergrößerung, Auflösungsvermögen und numerische Apertur eines Mikroskops definiert? Welche Aufgabe hat die Feldlinse im Mikroskop?
8. Zeichnen Sie den Strahlengang in einem astronomischen Fernrohr. Geben Sie die Größenordnung der üblicherweise verwendeten Brennweiten an.
9. Was bedeuten Astigmatismus, chromatische und sphärische Aberration?

2. Einführende Literatur

- P.A. Tipler, G. Mosca, J. Wagner (Hrsg.), *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure* 7. Auflage (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2015)
Kap. 29: Geometrische Optik
<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-54166-7>
- W. Demtröder, *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik* 6. Auflage (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013)
Kap. 9: Geometrische Optik
<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-29944-5>
- W. Schenk, F. Kremer (Hrsg.), *Physikalisches Praktikum* 14. Auflage (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2014)
Kap. Optik und Atomphysik - Linsen und Linsensysteme
<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-658-00666-2>

3. Grundlagen

Die Aufgabe der klassischen Optik besteht darin, die Ausbreitung des Lichtes in einem beliebig beschaffenen und begrenzten Medium vorauszusagen. Infolge der Wellennatur des Lichtes würde die Behandlung jeder derartigen Aufgabe die Lösung der Maxwell-Gleichungen unter Berücksichtigung der für jedes Problem charakteristischen Randbedingungen erfordern. Dieses Verfahren stößt sehr rasch auf außerordentliche mathematische Schwierigkeiten, so dass vereinfachte Lösungsmethoden notwendig sind.

Besonders einfache Verhältnisse liegen dann vor, wenn sämtliche in einem Problem auftretenden geometrischen Abmessungen groß sind verglichen mit der Wellenlänge des Lichts. In diesem Fall befindet man sich im Gültigkeitsbereich der „geometrischen Optik“. Sie interpretiert die Normalen auf den elektromagnetischen Wellenflächen als „Lichtstrahlen“ und stützt sich auf die folgenden Gesetze der Erfahrung:

- Geradlinige Ausbreitung des Lichtes in homogenen Medien, d.h. gerade Strahlen.
- Unabhängigkeit der Lichtstrahlen.
- Reflexionsgesetz.
- Brechungsgesetz.

Diese Gesetze genügen, um den Weg eines Lichtstrahls in einem beliebig vorgegebenen Medium vorauszusagen, wobei Reflexions- und Brechungsgesetz mehrfach angewendet werden können. Die vorstehenden Gesetze wurden von Fermat formal in seinem „Prinzip des kleinsten Lichtweges“ zusammengefasst. Hierbei ist der Lichtweg das Produkt aus Brechungsindex n und geometrischem Weg s . Mathematisch lautet das Fermatsche Prinzip:

$$\int_A^B n(s) ds = \text{Extremum} \quad (1)$$

Ein zwischen zwei festen Punkten A und B beliebig oft reflektierter bzw. gebrochener Lichtstrahl wählt stets denjenigen geometrischen Weg von A nach B, für den der Lichtweg ein Extremum ist, d.h. für den die Lichtlaufzeit minimal ist (optisch kürzester Weg).

Da die geometrische Optik die Wellennatur des Lichtes nicht berücksichtigt, versagt sie überall dort, wo die experimentellen Bedingungen so gehalten sind, dass ein für Wellen charakteristisches Phänomen auftritt:

- Beim Zusammentreffen mehrerer Lichtwellen mit bestimmten Phasendifferenzen in einem Punkt (Interferenz).
- Beim Durchgang einer Lichtwelle durch eine Öffnung, deren Abmessungen mit der Wellenlänge des Lichtes vergleichbar sind (Beugung).

3.1 Reflexionsgesetz

Trifft ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche zweier Medien, so wird er teilweise (oder im Spezialfall der Totalreflexion ganz) reflektiert (Abb. 1). Dabei gilt, dass der reflektierte Strahl in der Ebene liegt, die vom einfallenden Strahl und der Normalen im Auftreffpunkt gebildet wird, und der Reflexionswinkel α' ist gleich dem Einfallswinkel α :

$$\alpha' = \alpha \quad (2)$$

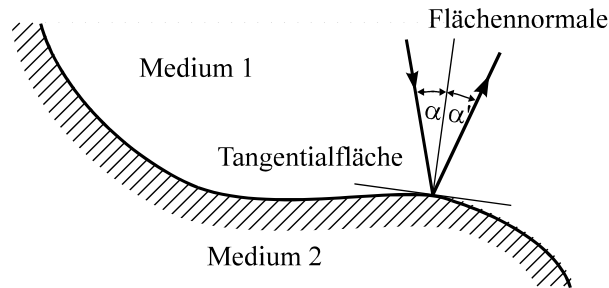


Abb. 1: Strahlengang bei Reflexion.

3.1 Brechungsgesetz

Der Teil des Lichtes, der beim Auftreffen auf eine Grenzfläche in das zweite Medium eindringt, wird i.a. gebrochen (Abb. 2).

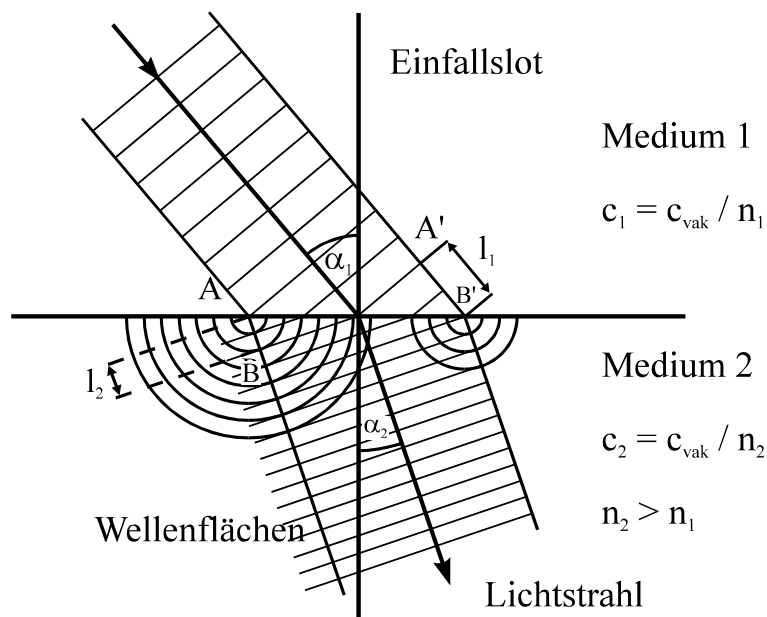


Abb. 2: Brechungsgesetz.

Dabei gilt das Brechungsgesetz von Snellius:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Ist der Brechungsindex $n_2 < n_1$, kann es dabei zur Totalreflexion kommen, d.h. das Licht kann nicht mehr in das Medium 2 eindringen; dies ist dann der Fall, wenn $\alpha_2 \geq 90^\circ$ wird. Die Brechzahlen n sind i.A. abhängig von der Wellenlänge des Lichts (Dispersion).

3.2 Dünne Linsen

Unter dünnen Linsen versteht man solche Linsen, deren Dicke sehr klein gegen ihre Brennweite ist. Dann fallen die Hauptebenen (s. S. 7) praktisch zusammen, und es gilt für die Strahlen nahe der optischen Achse die Linsenformel

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (4)$$

wobei Gegenstandsweite a , Bildweite b und Brennweite f von der Linsenmitte gerechnet werden.

Die Brechkraft $1/f$ einer solchen Linse ist durch den Brechungsindex n und die Krümmungsradien r_1 und r_2 der kugelförmigen Begrenzungsflächen festgelegt nach:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (5)$$

Für Sammellinsen gilt $f > 0$, für Zerstreuungslinsen entsprechend $f < 0$.

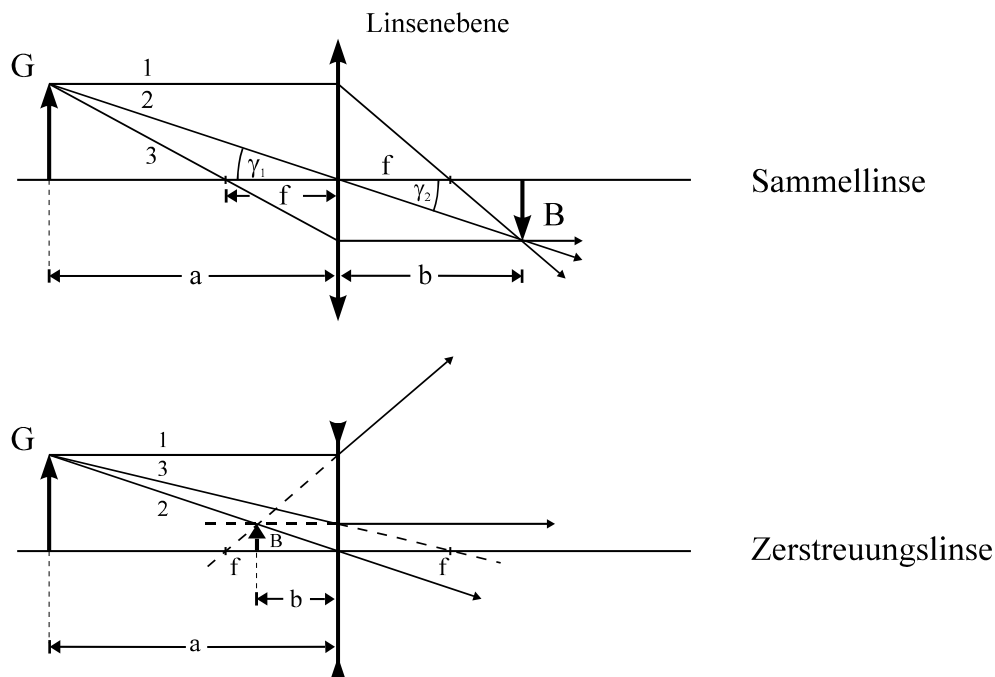


Abb. 3: Abbildende Strahlengänge bei dünnen Linsen.

Zur Konstruktion eines Bildes kann man auf die Berechnung der Bildlage verzichten, wenn man die folgenden ausgewählten Strahlen zeichnet (Abb. 5):

1. den *Parallelstrahl* (1), der vom Gegenstand parallel zur optischen Achse verläuft und daher zu einem Brennpunkt hin gebrochen wird (bei der Sammellinse ist es der hinter der

Linse liegende Brennpunkt, bei der Zerstreuungslinse zeichnet man den virtuellen Strahl zu dem Brennpunkt, der vor der Linse liegt),

2. den *Brennstrahl* (3), der vom Gegenstand durch einen Brennpunkt geht und daher so gebrochen wird, dass er danach parallel zur optischen Achse verläuft (Bei der Sammellinse ist es der vor der Linse liegende, bei der Zerstreuungslinse der hinter der Linse liegende Brennpunkt),
3. den *Mittelpunktstrahl* (2), der durch den Durchstoßpunkt der optischen Achse in der Linsenebene verläuft und nicht gebrochen wird.

Eine alternative Möglichkeit zur Bildkonstruktion ist die Bestimmung der Bildweite mit der Abb. 4, die die graphische Entsprechung der Abbildungsgleichung darstellt und daher alle Abbildungsmöglichkeiten durch Sammell- und Zerstreuungslinsen zusammenfasst.

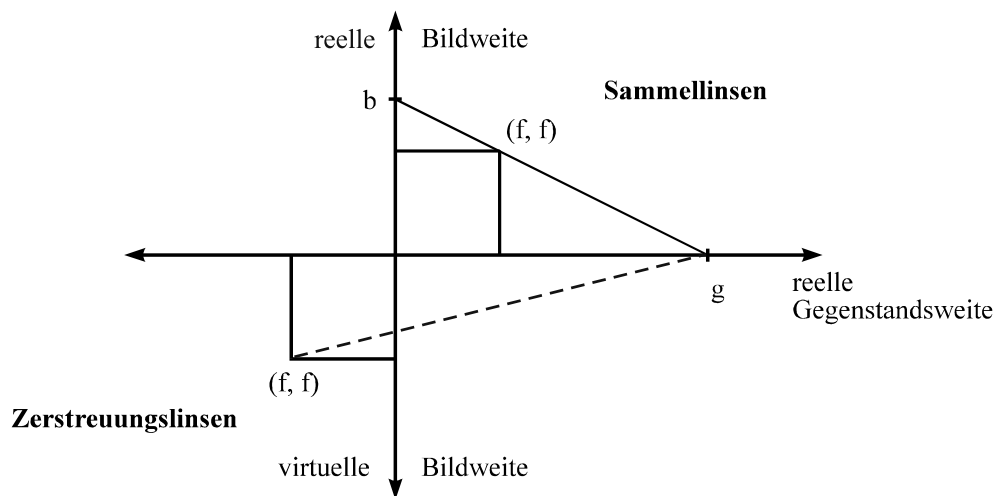


Abb. 4: Graphische Bestimmung der Bildweite.

Man findet die Bildweite, indem man von dem Punkt der Gegenstandsweite g auf der Abszisse eine Gerade durch den Punkt (f, f) legt. Ihr Schnittpunkt mit der Ordinate liefert auf dieser die zugehörige Bildweite. Wegen der Beziehung $B/G = b/g$ (B Bildgröße, G Gegenstandsgröße, b Bildweite, g Gegenstandsweite) ergibt sich daraus direkt auch der Abbildungsmaßstab B/G der Abbildung und damit die Größe des Bildes. Der Punkt (f, f) liegt bei Sammellinsen im oberen rechten Quadranten, bei Zerstreuungslinsen -da dort die Brennweite negativ gezählt wird- im unteren linken Quadranten. Fällt die Bildweite auf den negativen Ast der Ordinatenachse, so ist das Bild virtuell.

3.3 Linsensysteme

Zur Korrektur der Abbildungsfehler sind Systeme mehrerer Linsen erforderlich, deren Dicke i.a. nicht mehr klein gegen die Brennweite ist. Auch das Auge ist ein solches System mit mehreren brechenden Flächen. Im Prinzip kann die Abbildung mittels solcher Systeme durch sukzessive Anwendung der Abbildungsgleichung auf jede Linse des Systems ermittelt werden. Diese Methode ist aber sehr umständlich. Man kann sie umgehen, indem man eine gegenstandsseitige und eine bildseitige Hauptebene einführt (Abb. 5). Misst man die Bildweite von der bildseitigen, die Gegenstandsweite von der gegenstandsseitigen Hauptebene aus, so gilt die Abbildungsgleichung auch für Linsensysteme und für Linsen, deren Dicke groß gegen die Brennweite ist. Mit den Hauptebenen führt man ein optisches Ersatzbild ein, wobei die Wege

der Lichtstrahlen und ihre Brechungen innerhalb des Linsensystems außer Acht gelassen werden. Die beiden Hauptebenen brauchen nicht innerhalb des Linsensystems zu liegen, wie die Beispiele in Abb. 6 zeigen.

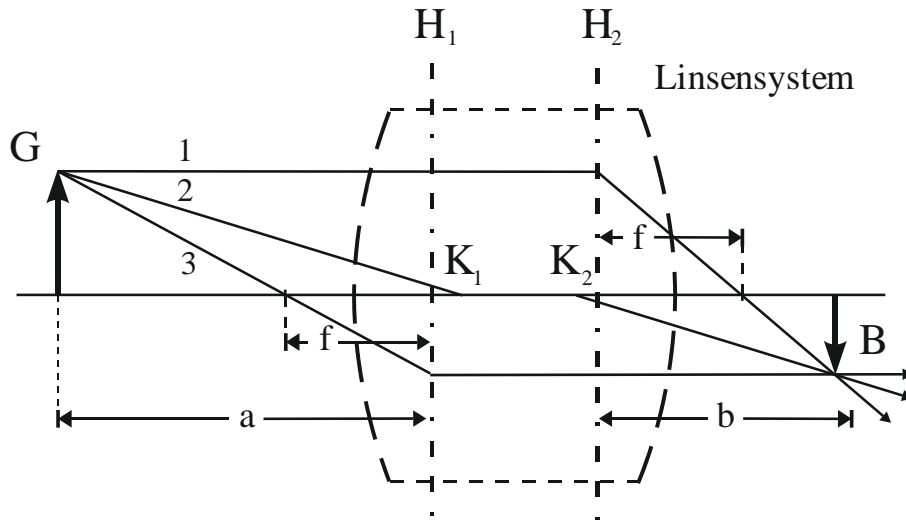


Abb. 5: Hauptebenen dicker Linsen.

Die Hauptebenen lassen sich durch Konstruktion folgender fiktiver Strahlen (Abb. 5) finden: der achsenparallel einfallende Strahl (1) durchläuft das System unbeeinflusst bis zur bildseitigen Hauptebene H_2 und wird dort zum bildseitigen Brennpunkt hin gebrochen; der durch den gegenstandsseitigen Brennpunkt gehende Strahl (3) erfährt dagegen an der gegenstandsseitigen Hauptebene H_1 eine einmalige Brechung und durchläuft dann als Parallelstrahl das System. Den Mittelpunktstrahl, den man bei dünnen Linsen zur Bildkonstruktion verwendet, kann man in Linsensystemen nicht einzeichnen. Es gibt jedoch bei allen Abbildungen einen fiktiven Strahl, der in seiner Richtung durch das System nicht abgelenkt, sondern nur parallel versetzt wird, nämlich den Strahl (2). Seine Schnittpunkte mit der optischen Achse sind die sog. „Knotenpunkte“ K_1 und K_2 . Hauptebenen und Knotenpunkte bezeichnet man als „Kardinalelemente“. Mit ihrer Hilfe lässt sich eine Abbildung eines Linsensystems also ähnlich einfach konstruieren wie bei dünnen Linsen. Man muss sich dabei jedoch vor Augen halten, dass die Anordnung der Kardinalelemente zwar dieselben abbildenden Eigenschaften hat wie das Linsensystem, wenn wir uns an die angegebenen Vorschriften zur Konstruktion der fiktiven Strahlen halten, die wirklichen Strahlen innerhalb des Systems aber ganz anders verlaufen.

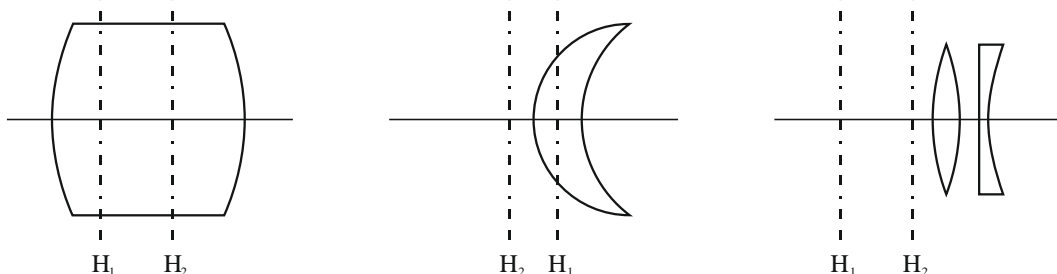


Abb. 6: Mögliche Lagen der Hauptebenen.

Ein einfacher Spezialfall eines Linsensystems ist das Objektiv aus zwei dünnen Linsen der Brennweiten f_1 und f_2 . Die resultierende Brennweite ist gegeben durch

$$\frac{1}{f_{res}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (6)$$

d.h. die Einzelbrechkraften addieren sich zur Gesamtbrechkraft. Dies gilt allerdings nur, wenn der Linsenabstand D klein ist gegenüber f_1 und f_2 . Wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist, muss man die allgemeine Beziehung heranziehen:

$$\frac{1}{f_{res}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{D}{f_1 f_2} \quad (7)$$

3.4 Bündelstrahlengang

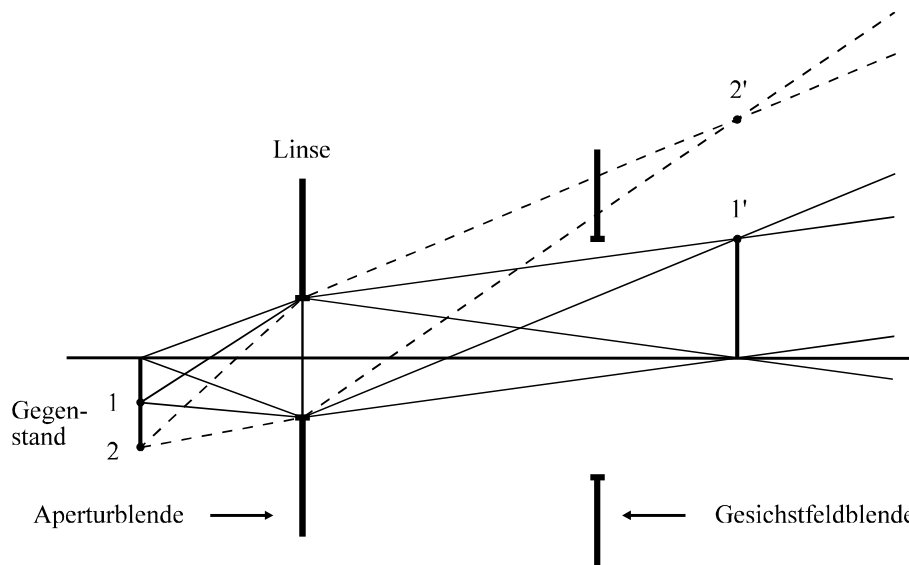


Abb. 7: Begrenzung eines Strahlenbündels durch Blenden.

Zur Darstellung der tatsächlich in einem System auftretenden wirksamen Strahlen zeichnet man den Bündelstrahlengang. Der Querschnitt des von einem Gegenstandspunkt ausgehenden und durch das optische System laufenden Bündels von Lichtstrahlen ist durch Blendenöffnungen begrenzt, beispielsweise durch die Fassung der Linse. Da i.a. die ausgezeichneten Strahlen, die man zur Bildkonstruktion verwendet, nicht in dem Bündel enthalten sind, muss man bei der Konstruktion des Bündelstrahlengangs das Abbildungsgesetz zur Berechnung der Bildweite zu Hilfe nehmen oder zusätzlich den abbildenden Strahlengang zeichnen. Der die realen Verhältnisse eines optischen Systems berücksichtigende Bündelstrahlengang ermöglicht Aussagen über die Helligkeit von Bildpunkten, über das Gesichtsfeld, sowie über die auftretenden Abbildungsfehler. Zwei Blenden begrenzen im Wesentlichen die durch ein optisches System laufenden Strahlen, die Aperturblende und die Gesichtsfeldblende. Die Aperturblende oder Öffnungsblende bestimmt den Öffnungswinkel der von den Gegenstandspunkten ausgehenden Lichtbündel. Damit ist durch sie die Helligkeit der entsprechenden Bildpunkte festgelegt, d.h. die durch das optische System übertragene Strahlungsleistung. Die Aperturblende bestimmt neben der Bildhelligkeit auch das Auflösungsvermögen optischer Instrumente (das Auflösungsvermögen des Mikroskops hängt vom Öffnungswinkel ab). Als Gesichtsfeld bezeichnet man diejenige Fläche in der Gegenstandsebene, aus welcher Lichtstrahlen durch das System laufen können. Die Blende, die das Gesichtsfeld begrenzt, nennt man Ge-

sichtsfeldblende. Sie bestimmt also, welche Gegenstandspunkte abgebildet werden. In Abb. 7 ist an einem einfachen Beispiel die Wirkung der beiden Blenden gezeigt.

Die Gesichtsfeldblende eines Mikroskops oder Fernrohrs erkennt man als schwarze Umrandung des beobachteten Gegenstandsfeldes. Durch geeignete Zusatzlinsen (Kondensor- oder Feldlinsen) gelingt es, das Gesichtsfeld optischer Instrumente zu vergrößern. Wird das Bild mit dem Auge betrachtet, so übernimmt oft die Augenpupille die Rolle der Gesichtsfeldblende.

3.5 Mikroskop

Das Mikroskop dient zur stark vergrößerten Betrachtung kleiner Gegenstände, die direkt vom Auge kaum oder nicht mehr wahrgenommen werden können. Das Auge kann Strukturen eines Gegenstandes in deutlicher Sehweite nicht mehr auflösen, wenn ihr gegenseitiger Abstand kleiner als 0,1 mm ist. Mit dem Lichtmikroskop kann man hingegen noch benachbarte Punkte im Abstand von 5×10^{-4} mm auflösen, d. h. getrennt erkennen. Geeignete Linsensysteme ermöglichen es, reelle Bilder großer Vergrößerungen mit geringen Abbildungsfehlern zu erzeugen. Dazu entwirft man im Mikroskop zuerst ein reelles Zwischenbild und von diesem dann mit einer Lupe ein nochmals vergrößertes virtuelles Bild, das mit dem Auge betrachtet wird (Abb. 8). Meist fügt man der Lupe (die auch Augenlinse genannt wird) noch eine Korrekturlinse, die sog. Feld- oder Kollektivlinse bei und bezeichnet beide zusammen als Okular. Um eine Ermüdung des Auges zu vermeiden, wird das virtuelle Bild normalerweise ins Unendliche gelegt. Das objektiv messbare Maß für die Vergrößerung bei Betrachtung mit dem Auge ist der Sehwinkel ε , den die Verbindungsgeraden zweier Gegenstandspunkte mit dem Auge bilden. Je näher ein Gegenstand dem Auge, desto größer ist ε . Wenn sich der Gegenstand in der deutlichen Sehweite s_0 befindet, dann bezeichnen wir den Sehwinkel mit ε_0 . Als Vergrößerung oder subjektive Vergrößerung definieren wir

$$V_s = \frac{\tan \varepsilon}{\tan \varepsilon_0} \quad (8)$$

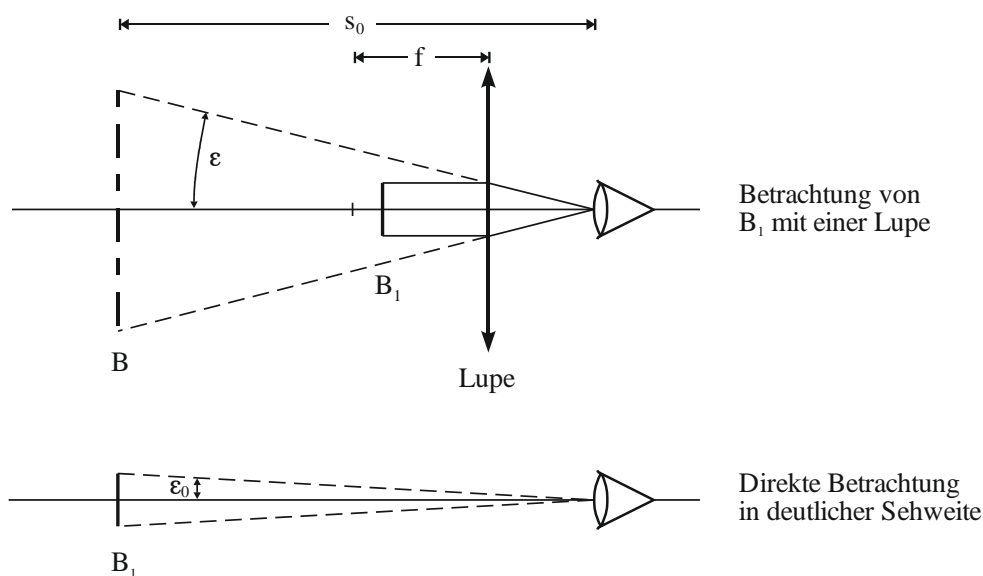


Abb. 8: Direkte und indirekte Betrachtung eines Bildes.

Beim Mikroskop erfolgt die Vergrößerung in zwei Schritten (Abb. 10): Das kurzbrennweitige Objektiv erzeugt ein stark vergrößertes reelles Bild der Größe B_1 mit dem Abbildungsmaßstab $V_1=B_1/A$, wobei A die Gegenstandsgröße ist. Die anschließende Lupenvergrößerung durch das Okular liefert das virtuelle Endbild B mit der subjektiven Vergrößerung V_s . In unserem Versuch soll das Endbild nicht im Unendlichen liegen, sondern in deutlicher Sehweite s_0 . (Der Grund dafür ist, dass es dann eine einfache direkte Bestimmungsmethode für die Gesamtvergrößerung gibt, die in Aufgabe 3 durchgeführt wird). In diesem Fall ist das Endbild endlich groß, und wir erhalten den Abbildungsmaßstab $V_2=B/B_1$. Die Gesamtvergrößerung ergibt sich als Produkt der Abbildungsmaßstäbe $V_{\text{ges}}=V_1V_2$.

3.6 Autokollimationsmethode

Die Brennweite einer Sammellinse lässt sich unter Benutzung der Abbildungsgleichung bestimmen, indem man eine Abbildung ausmisst. Eine einfachere Methode stellt aber die „Autokollimation“ dar. Befindet sich ein Gegenstand im Brennpunkt einer Sammellinse, so sind die von ihm ausgehenden Lichtstrahlen hinter der Linse parallel, so dass sie, wenn sie von einem senkrecht zur optischen Achse stehenden ebenen Spiegel reflektiert werden, von der Linse wieder im Brennpunkt vereinigt werden. Genau dann, wenn der Abstand zwischen Gegenstand und Linse gleich der Brennweite f der Linse ist, entsteht am Ort des Gegenstandes eine 1:1-Abbildung. Dreht man den Spiegel um einen kleinen Winkel, so kann man Objekt und Bild nebeneinander betrachten.

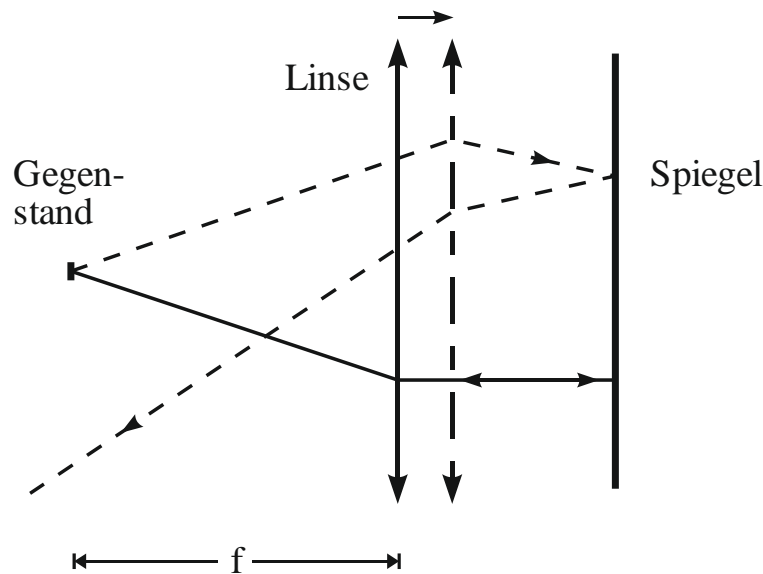


Abb. 9: Strahlengang bei Reflexion.

Mit dieser Methode lassen sich nur Sammellinsen ausmessen. Man kann sie aber auch auf Zerstreuungslinsen anwenden, wenn man diese mit einer stark brechenden Sammellinse mit bekannter Brennweite zu einem Linsensystem mit sammelnder Wirkung zusammensetzt. Die Gl. (6) ermöglicht es dann, die Brennweite der Zerstreuungslinse aus der resultierenden Brennweite zu berechnen.

4. Versuchsdurchführung

Aufgabe 1

Man bestimme mit Hilfe der Autokollimationsmethode die Brennweite von zwei dünnen Sammellinsen und einer Zerstreuungslinse.

Aufgabe 2

Man bestimme die Brennweite und die Lage der Hauptebenen eines Linsensystems (Objektivs). Dazu erzeugt man mittels einer Hilfslinse ein paralleles Lichtbündel (prüfen mit Autokollimation). Dieses parallele Licht wird vom Linsensystem im Brennpunkt vereinigt. Das entstandene Bild fängt man mit einem Schirm auf. Da die Lage der Hauptebenen nicht bekannt ist, kann man daraus die Brennweite nicht direkt bestimmen. Man wählt sich statt dessen eine Ablesemarke am Linsensystem und misst die Entfernung Ablesemarke-Schirm, $l_1 = h_1 + f$, wobei h_1 der Abstand zwischen Ablesemarke und Hauptebene H_1 ist. Nun entfernt man die Hilfslinse und macht eine 1:1-Abbildung mit dem Linsensystem (Prüfen: Bildgröße = Gegenstandsgröße). Diese Abbildung liegt im Abstand $2f$ von der Hauptebene H_1 . Die Entfernung Ablesemarke-Schirm beträgt also jetzt $l_2 = 2f + h_1$. Aus den beiden Messwerten für l_1 und l_2 kann man die Brennweite f und den Abstand h_1 , d.h. die Lage der Hauptebene H_1 , bestimmen. Zur Bestimmung von H_2 dreht man das Linsensystem um 180° und führt die gleiche Messung durch.

Fertigen Sie dann eine Skizze des Linsensystems an (mit Lage der Hauptebenen und der Brennpunkte).

Die Brennweite f kann noch auf eine andere Weise bestimmt werden, indem man die Vergrößerung $V = B/A = b/a$ für zwei verschiedene Bildweiten b_1 und b_2 misst. Aus der Abbildungsgleichung erhält man

$$f = \frac{b_1 - b_2}{V_1 - V_2} \quad (9)$$

Hierbei ist $b_1 - b_2$ gleich der Verschiebung des Schirms gegenüber dem Objektiv. V_1 und V_2 werden jeweils durch Ausmessen von Bild- und Gegenstandsgröße ermittelt.

Aufgabe 3

Man baue ein Mikroskop auf und bestimme seine Gesamtvergrößerung. Als Objektiv verwende man das kurzbrennweitige Linsensystem, das in Aufgabe 2 vermessen wurde. Mit einem Schirm beobachtet man, an welcher Stelle das vom Objektiv entworfene reelle Zwischenbild entsteht. Dieses Zwischenbild wird mit einer Lupe betrachtet (virtuelles Bild).

Bestimmung der Gesamtvergrößerung aus den Einzelvergrößerungen

Die Vergrößerung V des Mikroskops ist abhängig von der Vergrößerung des Objektivs V_1 und der des Okulars V_2 und ergibt sich zu $V = V_1 V_2$. Das vom Objektiv entworfene reelle Zwischenbild kann direkt mit einem Schirm mit mm-Teilung aufgefangen werden: $V_1 = B_1/A$. Das mit dem Okular betrachtete Bild ist virtuell, kann also nicht auf einem Schirm aufgefangen werden. Daher kann auch die Vergrößerung nicht gemessen werden, sondern sie muss mit Hilfe der Abbildungsgleichung berechnet werden, unter Verwendung der Bedingung, dass das Endbild in deutlicher Sehweite s_0 liegen soll. Die Vergrößerung V_2 des Okulars ergibt sich dann zu

$$V_2 = \frac{s_0}{f_2} + 1 \quad (10)$$

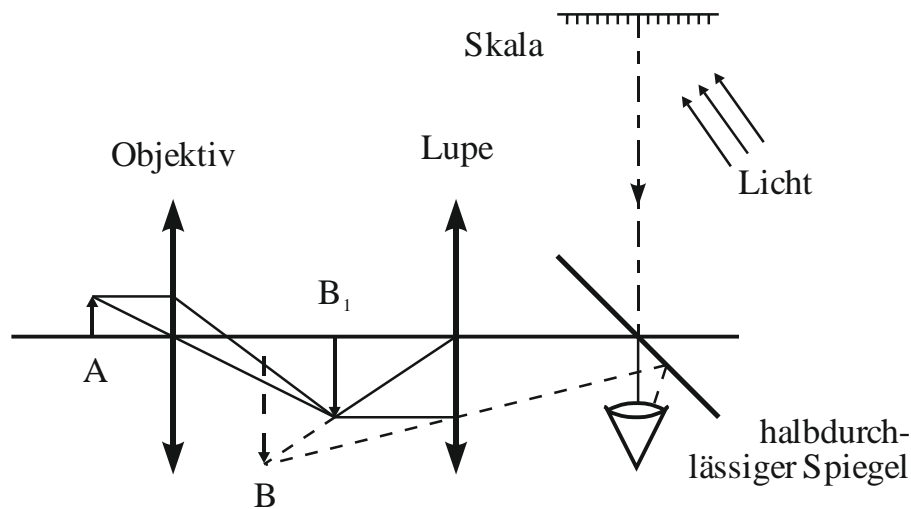


Abb. 10: Direkte Bestimmung der Gesamtvergrößerung des Mikroskops.

Direkte Bestimmung der Gesamtvergrößerung

Eine einfache Art der direkten Vergrößerungsbestimmung besteht darin, eine Skala in den Strahlengang einzublenden, die zugleich mit dem Endbild betrachtet wird. Sie besteht aus einer cm-Teilung und wird über einen halbtransparenten Spiegel hinter dem Okular betrachtet (Abb. 10). Wichtig ist, dass ihr Abstand vom Auge gleich dem Bildabstand ist (deutliche Sehweite $s_0=25$ cm). Man kann so die vom Mikroskop vergrößerte mm-Teilung und die cm-Teilung der Skala gleichzeitig beobachten, also die Vergrößerung direkt ablesen.

Man baue das Okular des Mikroskops aus einer Feldlinse und einer Lupe auf und beschreibe qualitativ die Veränderung des Bildes gegenüber demjenigen ohne Feldlinse.