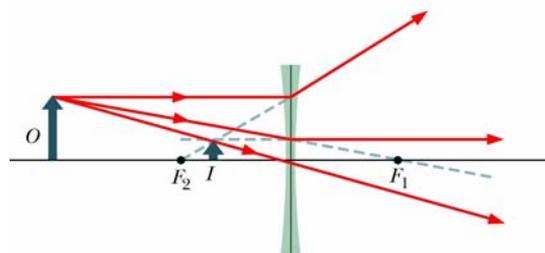
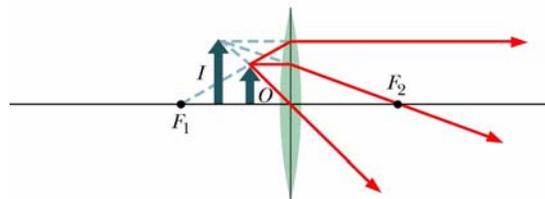
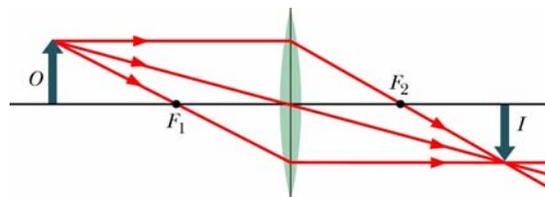


# Physikalisches Grundpraktikum

## Geometrische Optik



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

### Kontaktadressen der Praktikumsleiter:

Dr. Manfred Deicher  
Zimmer: 1.11, Gebäude E 2.6  
e-mail: [manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de](mailto:manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de)  
Telefon: 0681/302-58198

Dr. Patrick Huber  
Zimmer: 3.23, Gebäude E2.6  
e-mail: [p.huber@physik.uni-saarland.de](mailto:p.huber@physik.uni-saarland.de)  
Telefon: 0681/302-3944

## GEOMETRISCHE OPTIK

<b>Stoffgebiet</b>	Huygensches Prinzip
	Lichtstrahlen
	Brechungsgesetz
	Fermatsches Prinzip
	Optische Abbildungen
	Abbildungsgleichungen
	Linsensysteme
	Kardinal-elemente
	Abbildungsmaßstab
	Subjektive Vergrößerung
	Mikroskop

**Fragen:**

1. Erklären Sie das Fermatsche Prinzip.
2. Erläutern Sie anhand des Fermatschen Prinzips rechnerisch das Reflexions- und Brechungsgesetz.
3. Was versteht man unter dem Huygensschen Prinzip?
4. Erklären Sie die Lichtbrechung an einer Grenzfläche mit dem Huygensschen Prinzip.
5. Wie lautet die Abbildungsgleichung? Wie konstruiert man bei dünnen Linsen einen Strahlengang?
6. Wie sind die Hauptebenen eines Linsensystems definiert?
7. Was bedeutet:
  - a) Astigmatismus
  - b) chromatische Aberration
  - c) sphärische Aberration?
8. Zeichnen Sie den abbildenden Strahlengang und den Bündelstrahlengang in einem Mikroskop. Geben Sie die Größenordnung der üblicherweise verwendeten Brennweiten an.
9. Wie sind Gesamtvergrößerung, Auflösungsvermögen und numerische Apertur eines Mikroskops definiert? Welche Aufgabe hat die Feldlinse im Mikroskop zu erfüllen?
10. Zeichnen Sie den Strahlengang in einem astronomischen Fernrohr. Geben Sie die Größenordnung der üblicherweise verwendeten Brennweiten an.

## 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 Lichtes. 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 4 Gesetze der Erfahrung:

1. Geradlinige Ausbreitung des Lichtes in homogenen Medien, d.h. gerade Strahlen
2. Unabhängigkeit der Lichtstrahlen
3. Reflexionsgesetz
4. Brechungsgesetz

Diese Gesetze genügen, um den Weg eines Lichtstrahls in einem beliebig vorgegebenen Medium vorauszusagen, wobei Reflexions- und Brechungsgesetz u.U. mehrfach anzuwenden sind.

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:

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

d.h. 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. Diese Aussage ist ein Sonderfall der Variationsprinzipien, welche die elegantesten mathematischen Formulierungen der physikalischen Naturgesetze darstellen.

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, also:

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

## Reflexionsgesetz

Trifft ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche zweier Medien, so wird er teilweise (oder, im Spezialfall der Totalreflexion, auch ganz) reflektiert (Fig.1).

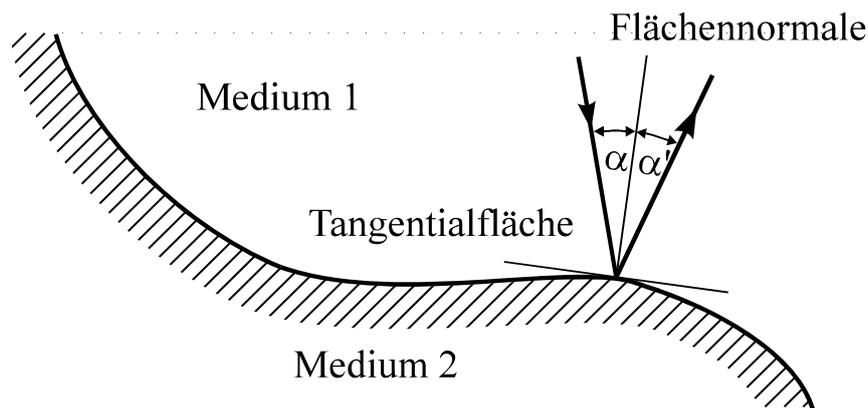


Fig. 1

Dabei gilt das Reflexionsgesetz: der reflektierte Strahl liegt in der Ebene, die vom einfallenden Strahl und der Normalen im Auftreffpunkt gebildet wird, und der Reflexionswinkel  $\alpha'$  ist gleich dem Einfallswinkel  $\alpha$ .

$$\alpha' = \alpha$$

## Brechungsgesetz

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

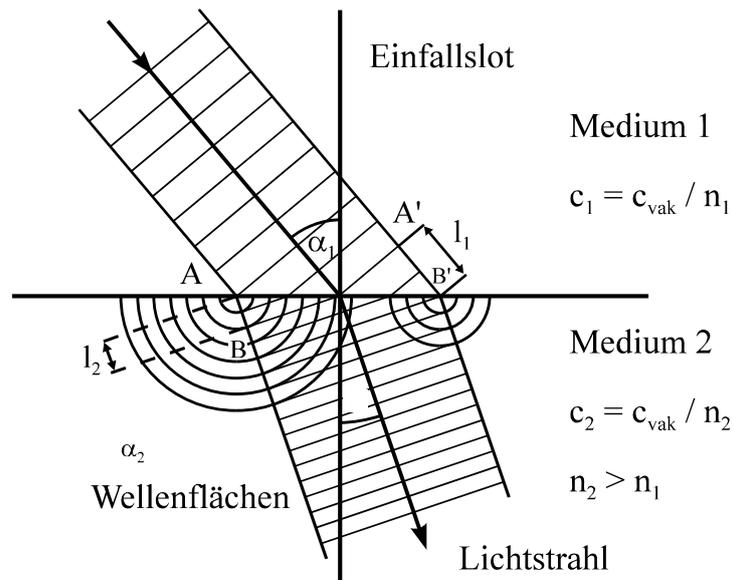


Fig. 2

Dabei gilt das Brechungsgesetz von Snellius:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Ist  $n_2 < n_1$ , 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.

Beachte: Die Brechzahlen  $n$  sind i.A. abhängig von der Wellenlänge des Lichtes:

$$n = n(\omega) \quad (\text{Dispersion})$$

## Dünne Linsen

Unter dünnen Linsen versteht man solche Linsen, deren Dicke sehr klein gegen ihre Brennweite ist. Dann fallen die Hauptebenen (s. S. (GO 8)) praktisch zusammen, und es gilt für die Strahlen nahe der optischen Achse die Linsenformel:

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

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:

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

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

Zur Konstruktion eines Bildes kann man auf die Berechnung der Bildlage verzichten, wenn man die folgenden ausgewählten Strahlen zeichnet (Fig. 3):

- 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.

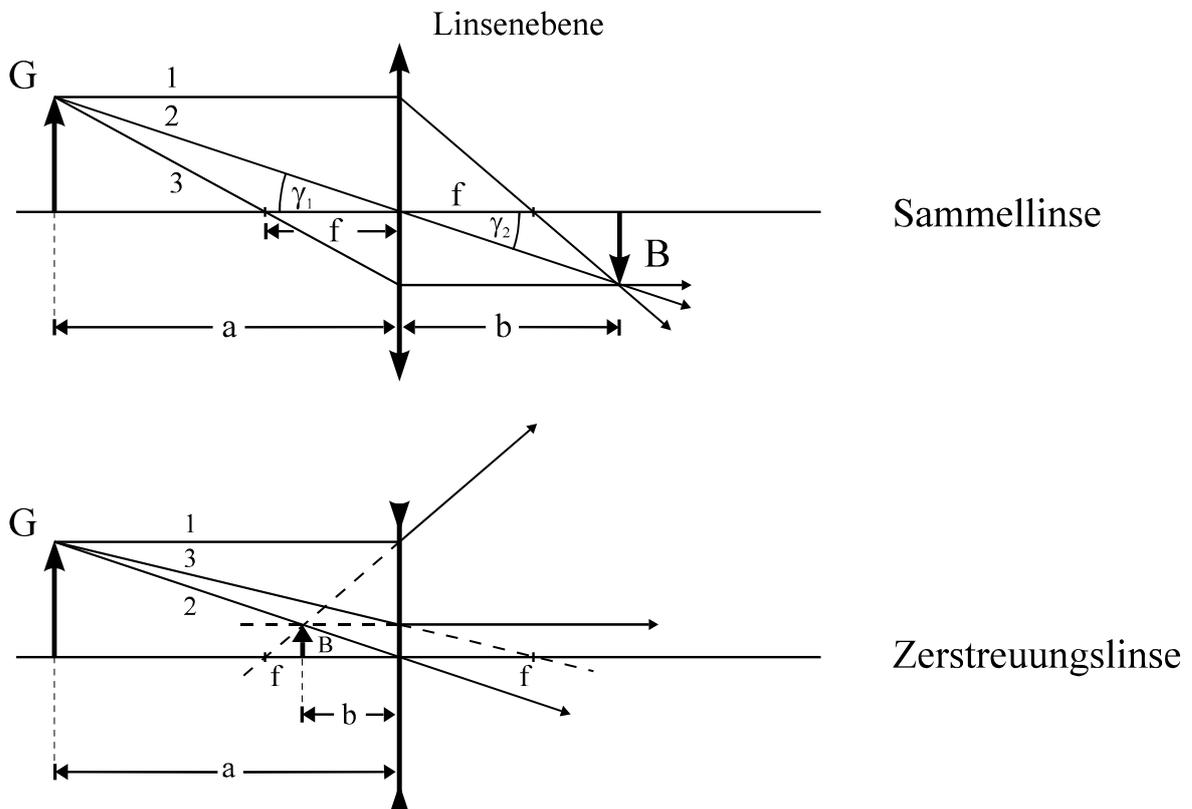


Fig. 3

Eine alternative Möglichkeit zur Bildkonstruktion ist die graphische Bestimmung der Bildweite mit Hilfe der folgenden Abbildung, die die graphische Entsprechung der Abbildungsgleichung darstellt und daher alle Abbildungs-möglichkeiten durch Sammellinsen und Zerstreuungslinsen zusammenfaßt:

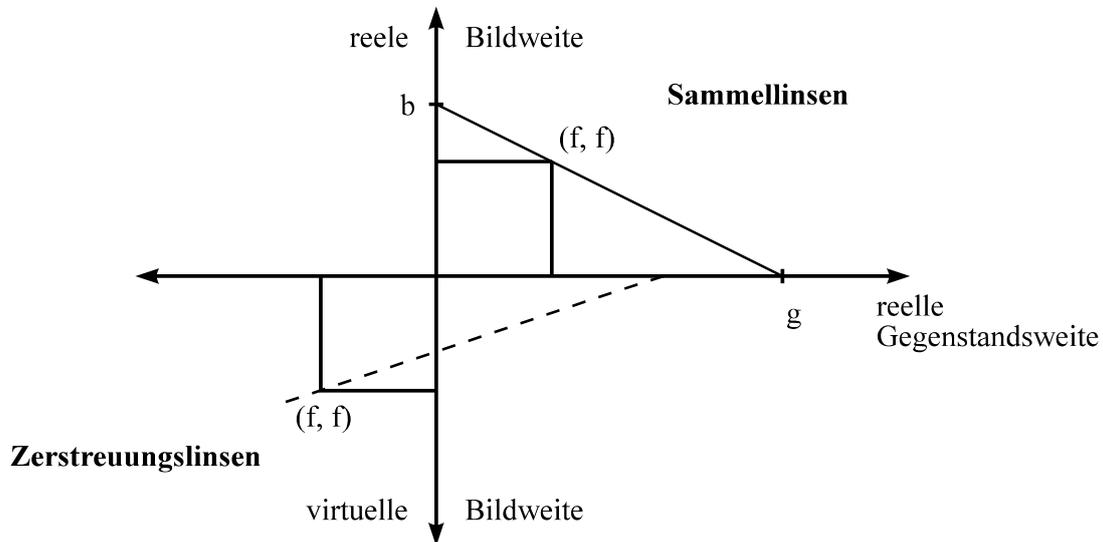


Fig. 4

Man findet die Bildweite, indem man von dem Punkt der Gegenstandsweite 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.

## 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.

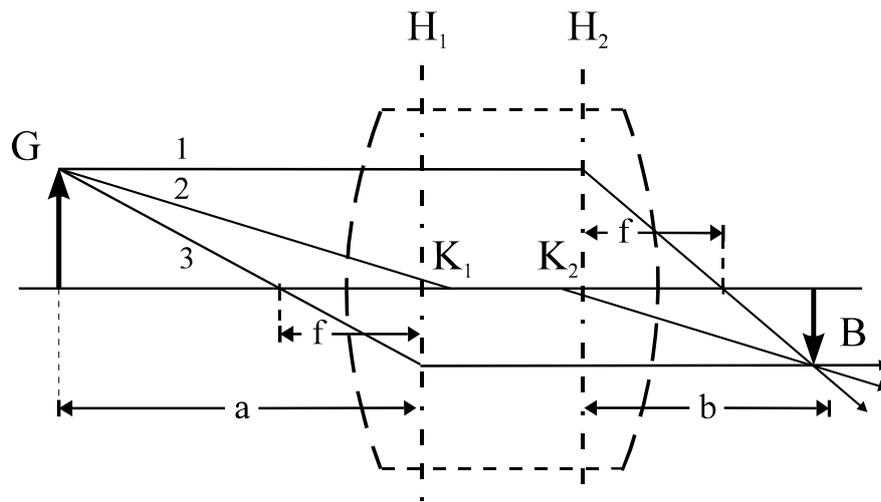


Fig. 5

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 (Fig. 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 Fig. 6 zeigen:

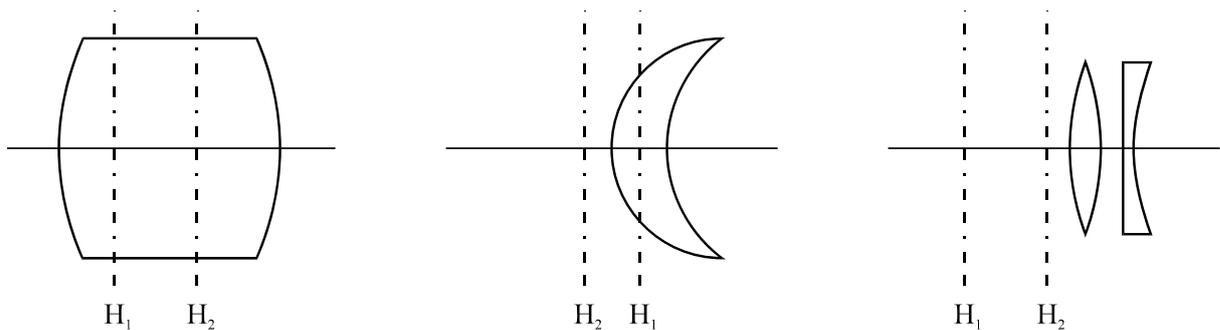


Fig. 6

Die Hauptebenen lassen sich durch Konstruktion folgender fiktiver Strahlen (Fig. 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.

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

$$\frac{1}{f_{\text{res}}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

d.h. die Einzelbrechkräfte 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:

$$\frac{1}{f_{\text{res}}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{D}{f_1 \cdot f_2}$$

## BÜNDELSTRAHLENGANG

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 (z.B.: 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 Gesichtsfeldblende. Sie bestimmt also, welche Gegenstandspunkte abgebildet werden. In Fig. 7 ist an einem einfachen Beispiel die Wirkung der beiden Blenden gezeigt.

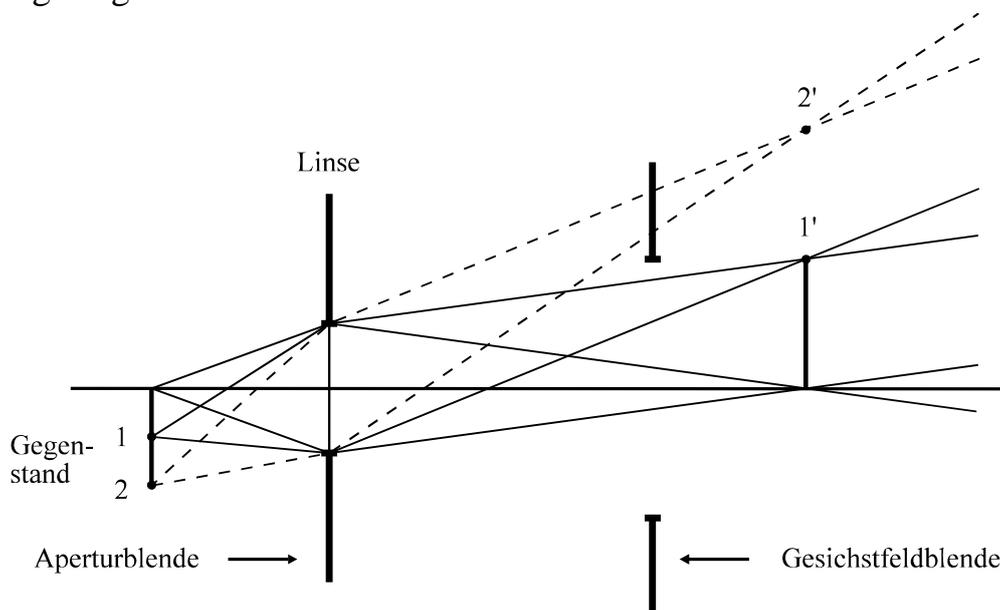


Fig. 7

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

## 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  $5 \cdot 10^{-4}$  mm auflösen, d.h. getrennt erkennen. Geeignete Linsensysteme

ermöglichen es, reelle Bilder großer Vergrößerungen mit geringen Abbildungsfehlern zu erzeugen. Daher 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. 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, den die Verbindungsgeraden zweier Gegenstandspunkte mit dem Auge bilden. Je näher ein Gegenstand dem Auge, desto größer ist . Wenn sich der Gegenstand in der deutlichen Sehweite  $s_0$  befindet, dann bezeichnen wir den Sehwinkel mit  $\varepsilon_0$ . Als Vergrößerung oder subjektive Vergrößerung definieren wir:

$$V_s = \frac{\tan \varepsilon}{\tan \varepsilon_0}$$

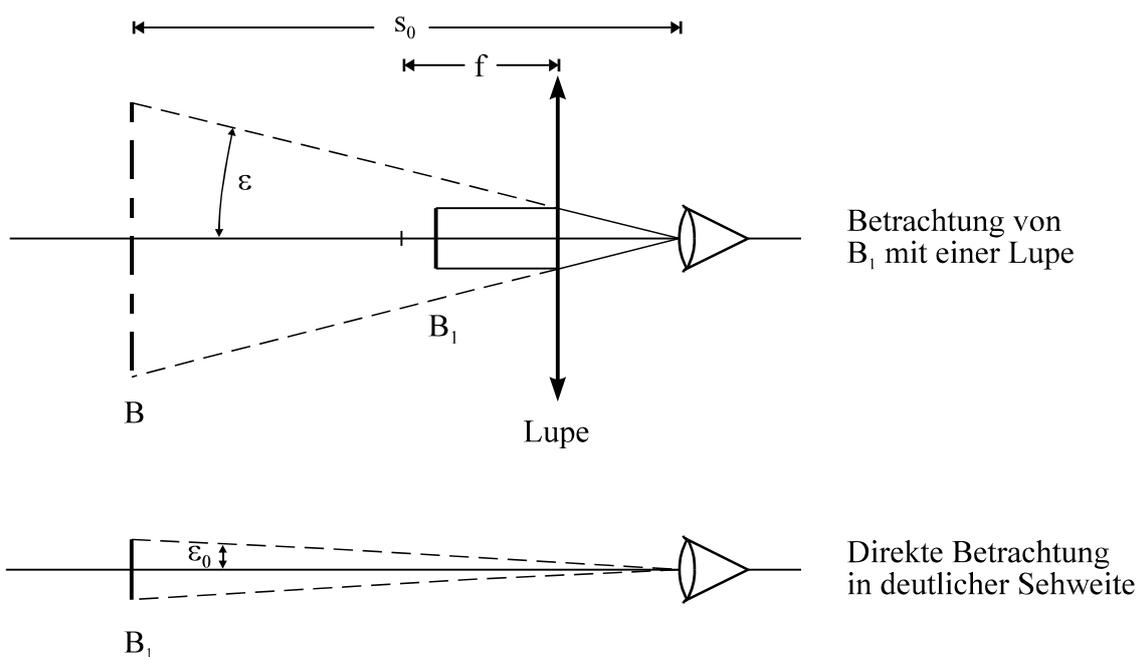


Fig. 8

Beim Mikroskop erfolgt die Vergrößerung in zwei Schritten (Fig. 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:  $V_{\text{ges}} = V_1 \cdot V_2$ .

## Autokollimationsmethode

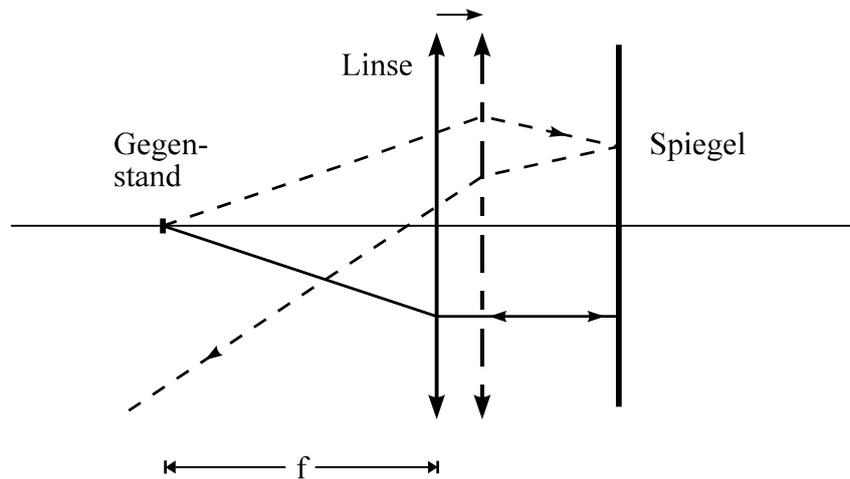


Fig. 9

Die Brennweite einer Sammellinse läßt sich unter Benutzung der Abbildungsgleichung bestimmen, indem man eine Abbildung ausmißt. Eine einfachere Methode stellt aber die "Autokollimation" dar.

### Prinzip:

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. D.h. 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.

Mit dieser Methode lassen sich nur Sammellinsen ausmessen. Man kann sie aber auch auf Zerstreuungslinsen anwenden, wenn man diese mit einer starkbrechenden Sammellinse mit bekannter Brennweite zu einem Linsensystem mit sammelnder Wirkung zusammensetzt. Die auf Seite (GO 9) angegebene Beziehung ermöglicht es dann, die Brennweite der Zerstreuungslinse aus der resultierenden Brennweite zu berechnen.

## Aufgaben

- 1) Man bestimme mit Hilfe der Autokollimationsmethode die Brennweite von 2 dünnen Sammellinsen und einer Zerstreuungslinse.
- 2) Man bestimme die Brennweite und die Lage der Hauptebenen eines Linsensystems. 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  $180^\circ$  und führt die gleiche Messung durch. Fertigen Sie dann eine Skizze des Linsensystems an (mit Lage der Hauptebenen und der Brennpunkte). Die Brennweite  $f$  wird noch auf eine andere Weise bestimmt, nämlich indem man die Vergrößerung  $V=B/A=b/a$  für zwei verschiedene Bildweiten  $b_1$  und  $b_2$  mißt. Aus der Abbildungsgleichung erhält man:

$$f = (b_1 - b_2) / (V_1 - V_2)$$

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.

- 3) Man baue ein Mikroskop auf und bestimme seine Gesamtvergrößerung.
- a) Aufbau  
Als Objektiv verwende man das kurzbrennweitige Linsensystem, das in Aufg. 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).
- b) 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  $V = V_1 \cdot V_2$ . 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

$$V_2 = \frac{s_0}{f_2} + 1$$

c) 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 halbdurchlässigen Spiegel hinter dem Okular betrachtet. Wichtig ist, daß ihr Abstand vom Auge gleich dem Bildabstand ist (**deutliche Sehweite  $s_0=25\text{cm}$** ).

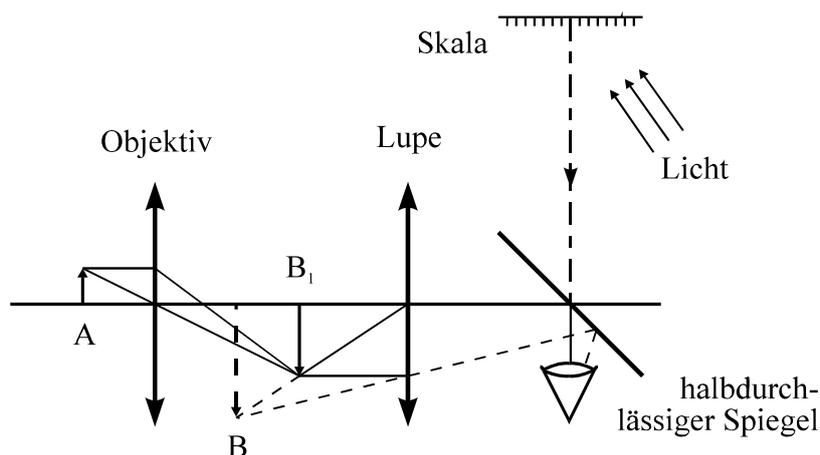


Fig. 10

Man kann so die vom Mikroskop vergrößerte mm-Teilung und die cm-Teilung der Skala gleichzeitig beobachten, also die Vergrößerung direkt ablesen.

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