

Versuch 17: Geometrische Optik / Mikroskop

Mit diesem Versuch sollen die Funktionsweise und Eigenschaften von Linsen und Linsensystemen untersucht werden. Dabei werden das Mikroskop und Abbildungsfehler bei Linsen genauer behandelt.

Vorkenntnisse

Grundlagen zur Optik: Funktionsweise von Sammell- und Zerstreuungslinsen – virtuelle und reelle Abbildung – Funktion von Blenden – Apertur – Dünne Linsen – Dicke Linsen – Linsensysteme – Brennweite – Schärfentiefe – Auflösungsvermögen – Tubuslänge

Linsenfehler: Sphärische Abberation – chromatische Aberration – Astigmatismus – Koma

Optische Geräte: Lupe – Mikroskop – Kondensorlinse – Achromat

Physikalische Grundlagen

Strahlengang

Zur Erklärung des physikalischen Lichtverhaltens wird das Licht in der geometrischen Optik als Lichtstrahl betrachtet. Als Näherung wird angenommen, dass sich Lichtstrahlen immer geradlinig ausbreiten und ihre Richtung nur dann ändern, wenn sie auf eine Grenzfläche treffen. Der Wellencharakter des Lichts wird vernachlässigt. Mehrere Lichtstrahlen werden als Lichtbündel behandelt. Wichtig bei diesem Modell ist das Prinzip der Umkehrbarkeit, das heißt, dass jeder Strahlengang auch dann allen optischen Gesetzen genügt, wenn die Ausbreitungsrichtung des Lichts umgekehrt wird. Zudem beeinflussen sich Lichtstrahlen nicht gegenseitig.

Die charakterisierenden Eigenschaften des Lichts im Rahmen der geometrischen Optik können innerhalb dieses Modells gut erfasst werden. Der Energietransport wird durch den Poynting-Vektor \vec{S} mit

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{E} \times \vec{B} \quad (1)$$

beschrieben. Im Zusammenhang damit steht die gemittelte Intensität der Lichtwelle in einem Medium, welche dem Betrag des über einige Perioden gemittelten Vektors \vec{S} entspricht. Es gilt

$$\bar{I} \sim E_0^2, \quad (2)$$

wobei E_0 die Amplitude des elektrischen Feldvektors ist. Zudem können einem Lichtstrahl eine Polarisation und eine Ausbreitungsgeschwindigkeit zugeordnet werden. Welleneigenschaften

Farbe	Wellenlänge (nm)	Frequenz (THz)
rot	$\approx 750 - 640$	$\approx 400 - 468$
gelb/orange	$\approx 640 - 580$	$\approx 468 - 517$
grün	$\approx 580 - 500$	$\approx 517 - 600$
blau	$\approx 500 - 440$	$\approx 600 - 681$
violett	$\approx 440 - 400$	$\approx 681 - 749$

Tabelle 1: Zusammenfassung des Farbspektrums im sichtbaren Bereich.

wie beispielsweise die Wellenlänge charakterisiert anschaulich die Farbe des Lichtstrahls. Das Farbspektrum im sichtbaren Bereich ist in Tab. 1 dargestellt.

Reflexion

Beim Übergang eines Lichtstrahls von einem Medium 1 in ein anderes Medium 2 wird ein Teil der Intensität reflektiert, der andere Teil tritt in das angrenzende Medium 2 ein. Der einfallende und der reflektierte Strahl liegen in einer gemeinsamen, senkrecht auf der Grenzfläche stehenden Ebene, und der Einfallswinkel α ist gleich dem Ausfallswinkel α' (siehe Abb. 1).

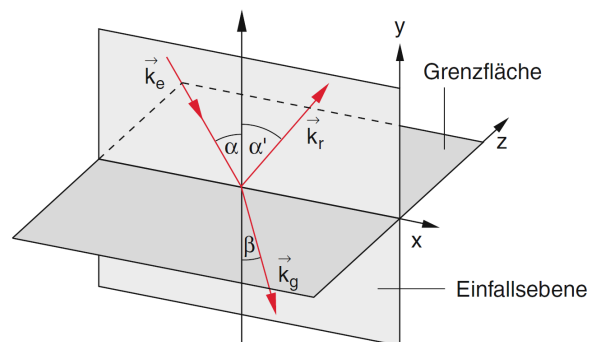


Abb. 1: Reflexion und Brechung an einer Grenzfläche. (Bildquelle: W. Demtröder, Experimentalphysik 2 „Elektrizität und Optik“, 6. Auflage, Springer-Verlag)

Die Reflexion lässt sich, wie auch die Brechung und die allgemeine Ausbreitung des Lichts, mithilfe des Fermatschen Prinzips erklären, welches aussagt, dass ein Lichtstrahl immer den Weg zwischen zwei Punkten wählt, für den er die kürzeste Zeit benötigt.

Brechungsgesetz

Um den Verlauf der Lichtstrahlen im Medium 2 zu beschreiben wird das von W. Snellius entwickelte Brechungsgesetz verwendet, welches sagt, dass das Produkt aus Brechungsindex und Sinus des Strahlenwinkels zur Normalen vor und nach der Brechung gleich sind (siehe Abb. 2).

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

Zur Herleitung dieses Gesetzes kann das Fermatsche Prinzip herangezogen werden (\rightarrow Vorbereitende Aufgaben). Hierfür wird nach der kürzesten Durchlaufzeit eines Lichtstrahls t von Punkt A nach Punkt B gesucht, also: $dt/dx = 0$.

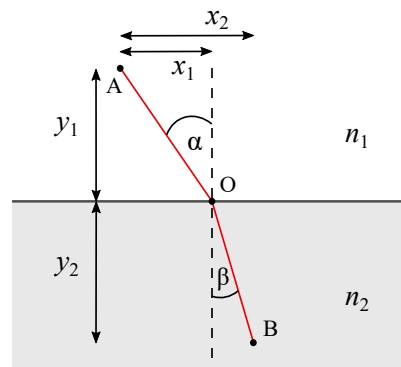


Abb. 2: Zeichnung zur Herleitung des Snelliusschen Brechungsgesetzes aus dem Fermatschen Prinzip. Es wird nach der kürzesten Durchlaufzeit eines Lichtstrahls von Punkt A nach Punkt B gesucht.

Linsen

Linsen sind transparente Körper mit zwei Grenzflächen, an denen Brechung stattfindet und deren optische Achsen zusammenfallen. Hauptsächlich werden Linsen durch ihre Brennweite charakterisiert. Dabei wird zwischen Sammellinsen (Konvexlinse) und Zerstreuungslinsen (Konkavlinse) unterschieden (siehe Abb. 3 (a) und (b)).

- **Konvexe Linsen:** Parallelstrahlen werden so gebrochen, dass sie in einen Punkt zusammenlaufen.
- **Konkave Linse:** Parallelstrahlen laufen bei Brechung auseinander.

Brennpunktstrahlen, Strahlen die durch den Brennpunkt F_1 verlaufen, werden beim Auftreffen auf die Linse zu Parallelstrahlen. Strahlen, die parallel zur optischen Achse verlaufen, und Parallelstrahlen werden zu Brennpunktstrahlen, welche durch den Brennpunkt F_2 verlaufen. Mittelpunktstrahlen, d.h. Strahlen, die durch den Mittelpunkt der Linse verlaufen, werden nicht gebrochen. Der Abstand des Brennpunktes zur Hauptebene der Linse wird dabei als Brennweite bezeichnet.

Entsteht bei der Abbildung eines Gegenstandes G ein Bild B , welches sich auf der vom Objekt abgewandten Seite befindet so wird dieses Bild als reell bezeichnet. Befindet sich das Bild auf der Seite, welche dem Objekt zugewandt ist, so wird dieses Bild als virtuell bezeichnet. Reelle

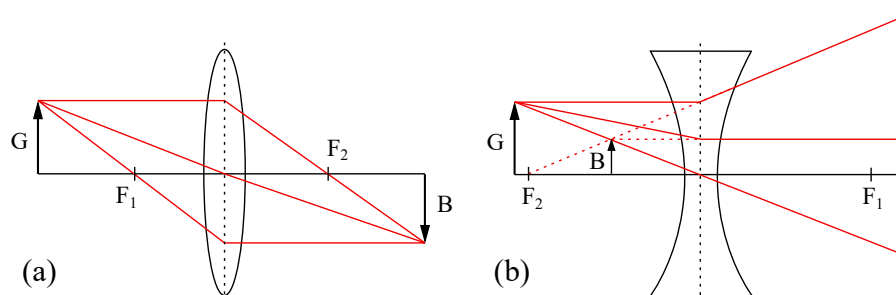


Abb. 3: Strahlengang an einer Konvexlinse/Sammellinse (a) und an einer Konkavlinse/Zerstreuungslinse (b) für Brennpunktstrahlen, Parallelstrahlen und Mittelpunktstrahlen. Die Linsenebene ist gestrichelt gekennzeichnet.

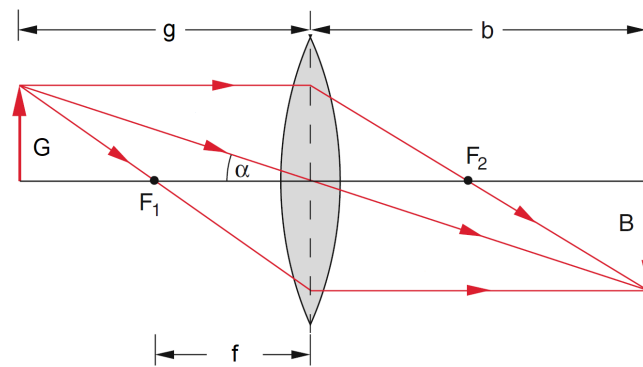


Abb. 4: Zeichnerische Konstruktion zur Linsengleichung. Die schwarze gestrichelte Linie gibt die Linsenebene an, die schwarze durchgezogene Linie die optische Achse. (Bildquelle: W. Demtröder, Experimentalphysik 2 „Elektrizität und Optik“, 6. Auflage, Springer-Verlag; modifiziert)

Bilder lassen sich im Gegensatz zu virtuellen mit einem Schirm auffangen. In Abb. 4 ist zu erkennen, dass die Strahlen durch die Punkte F_1 und F_2 verlaufen. Diese werden mit F wie Fokus abgekürzt.

Abbildungsgleichung

Aus der geometrischen Betrachtung dreier Lichtstrahlen, die von einem Gegenstand über eine Linse auf das Bild abgebildet werden, lässt sich diese Abbildungsgleichung zeichnerisch herleiten. Die Verhältnisse der Gegenstandsgröße G und der Bildgröße B zu der Gegenstandsweite g und Bildweite b und der Brennweite der Linse f erschließen sich direkt aus der Anwendung des Strahlensatzes. Aus Abb. 4 folgt die Abbildungsgleichung

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

für Brennweite, Bildweite und Gegenstandsweite. Diese Abbildungsgleichung gilt für dünne Linsen und achsennahe Strahlenverläufe. Für dicke Linsen werden beide Hauptebenen der Linse zur Herleitung einer Abbildungsgleichung benötigt (siehe Abb. 5). Bei dünnen Linsen fallen diese nahezu zusammen, sodass sie mit einer Ebene angenähert werden können. Für die Brennweite f einer dicken Linse gilt

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1) d}{n R_1 R_2} \right], \quad (5)$$

wobei $\overline{S_1 S_2} = d$ und R_1, R_2 die Krümmungsradien sind. Auf ähnliche Weise kann auch die Gesamtbrennweite eines Linsensystems f bestimmt werden, das aus zwei Linsen mit Brennweiten f_1 und f_2 zusammengesetzt ist, deren Hauptebenen sich im Abstand d zueinander befinden. Es ist

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 \cdot f_2}. \quad (6)$$

Durch den Aufbau eines Linsensystems kann die Brennweite einer Zerstreuungslinse bestimmt werden, wenn man die Brennweite der zweiten (Sammel-)Linse kennt und die Gesamtbrennweite f misst.

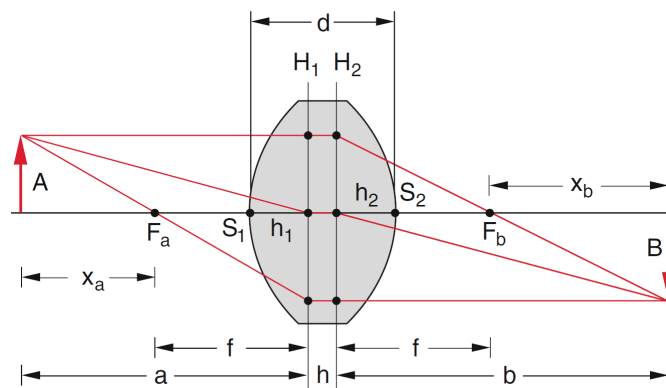


Abb. 5: Strahlengang an einer dicken Linse. Die beiden Hauptebenen der Linse H_1 und H_2 befinden sich im Abstand d zueinander. (Bildquelle: W. Demtröder, Experimentalphysik 2 „Elektrizität und Optik“, 6. Auflage, Springer-Verlag)

Besselsches Verfahren

Für die Bestimmung der Brennweite einer Linse (oder der Gesamtbrennweite eines Linsensystems) wird häufig das Besselsche Verfahren angewendet. Dazu wird bei einer optischen Bank mit fester Basislänge a , am einen Ende der Gegenstand G und am anderen Ende ein Schirm angebracht. Dazwischen wird die Linse bzw. das Linsensystem positioniert, dessen Brennweite man bestimmen möchte.

Ist der Abstand zwischen Schirm und Gegenstand größer als das Vierfache der Brennweite, gibt es genau zwei Linsenstellungen, bei denen die Linse ein scharfes Bild auf dem Schirm erzeugt: einmal erhält man ein vergrößertes Bild, bei der anderen Linsenstellung ein verkleinertes. Die Linse wird zwischen diesen beiden Positionen verschoben und es werden die jeweiligen Gegenstandsweiten g_1 und g_2 gemessen. Aus der Differenz ergibt sich der Abstand der beiden Linsenpositionen e . Die Brennweite der Linse ist dann

$$f = \frac{a^2 - e^2}{4a} \tag{7}$$

Das Besselsche Verfahren hat den Vorteil gegenüber der einfachen Berechnung aus Bild- und Gegenstandsweite mittels der Linsengleichung, dass bei dicken Linsen oder Linsensystemen die Lage der Hauptebenen nicht bekannt sein muss. Bei einem Linsensystem wird ein beliebiger Bezugspunkt P gewählt an dem die zwei Gegenstandsweiten abgelesen werden. Dadurch lässt sich die Gesamtbrennweite des Systems bestimmen.

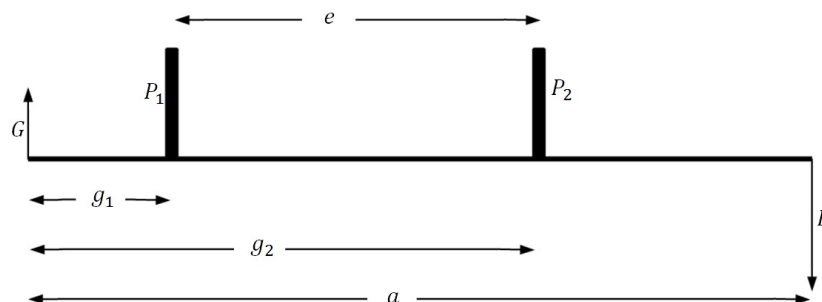


Abb. 6: Brennweitenbestimmung mit dem Besselschen Verfahren

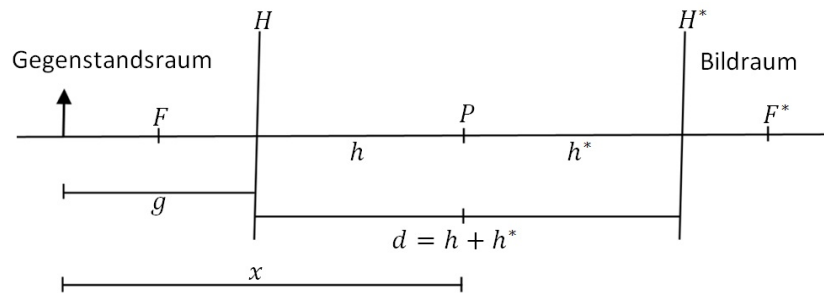


Abb. 7: Besselsches Verfahren für ein Linsensystem.

Mit diesem Verfahren und der Linsengleichung für dicke Linsen lässt sich so die Brennweite einer Zerstreuungslinse bestimmen, wenn der Abstand zwischen den Hauptebenen und die Brennweite der anderen Linse bekannt sind.

Linsenfehler

Chromatische Aberration

Bei Linsen oder Prismen spielt die Dispersion eine entscheidende Rolle. Dispersion bezeichnet die Abhängigkeit der Lichtbrechung von der Frequenz des Lichts. Da jeder Farbe des Lichts eine unterschiedliche Frequenz zugeordnet ist, werden diese unterschiedlich stark gebrochen. Dies ist die Ursache der chromatischen Aberration, welche sich aus den griechischen Wörtern *chroma* (Farbe) und *aberrare* (abschweifen) zusammensetzt. Trifft monochromatisches Licht auf eine Sammellinse, so laufen alle Strahlen in einem Punkt zusammen. Das gilt jedoch für polychromatisches Licht nicht mehr. Bei weißem Licht, welches aus allen Frequenzen des sichtbaren Bereichs besteht, ist dieser Fehler deutlich zu erkennen. Durch die unterschiedlich starke Brechung entstehen für die einzelnen Frequenzen unterschiedliche Brennweiten (siehe Abb. 8). Das durch die Linse entworfene Bild eines Gegenstandes zeigt dadurch farbliche Ränder.

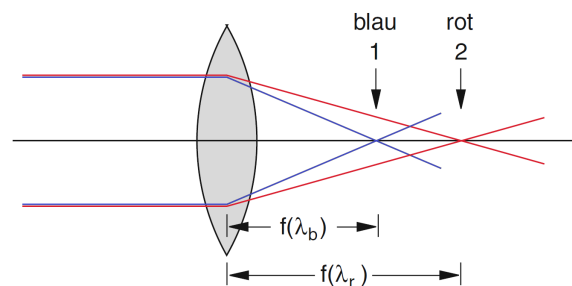


Abb. 8: Strahlengang bei chromatischer Aberration. (Bildquelle: W. Demtröder, Experimentalphysik 2 „Elektrizität und Optik“, 6. Auflage, Springer-Verlag; modifiziert)

Sphärische Aberration

Auch bei monochromatischem Licht können bei der Abbildung von Gegenständen mit Linsen Fehler entstehen. Die sphärische Form und die endliche Größe der Linse beeinflussen das Verhalten der Lichtstrahlen in Abhängigkeit zum Abstand zur optischen Achse. Es wird dabei zwischen achsennahen und achsenfernen Strahlen unterschieden. Die Abweichung der Brennweiten nimmt mit dem Abstand des Strahls zur optischen Achse zu.

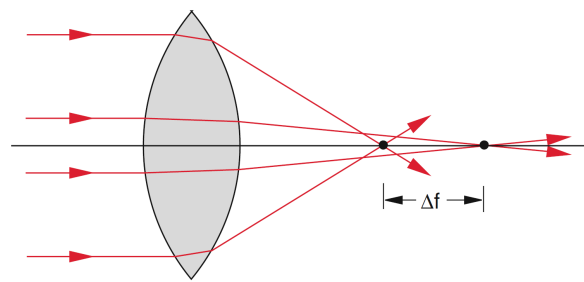


Abb. 9: Strahlengang bei sphärischer Aberration. (Bildquelle: W. Demtröder, Experimentalphysik 2 „Elektrizität und Optik“, 6. Auflage, Springer-Verlag)

Koma

Bei dem Linsenfehler Koma handelt es sich im Gegensatz zur sphärischen Aberration nicht um symmetrisch zur Symmetrieachse einfallende Lichtbündel, sondern um parallele Lichtbündel, die auf eine schief gestellte Linse treffen. Der Brechwinkel hängt dabei nicht mehr nur vom Abstand h zur optischen Achse ab wie bei der sphärischen Aberration, sondern wird durch einen weiteren Faktor beeinflusst: Es ist dabei entscheidend, ob die Strahlen oberhalb oder unterhalb des Mittenstrahls verlaufen. Daraus ergibt sich, dass bei der Abbildung eines Punktes A , welcher sich außerhalb der Symmetrieachse befindet, ebenfalls Koma auftritt. Bei der Abbildung des Punktes schneiden sich die Strahlen der verschiedenen Teilbündel in den Punkten F_{15} , F_{14} , F_{13} , F_{12} mit unterschiedlichen Abständen zur Symmetrieachse (siehe Abb. 10). Die Strahlen verlaufen aufgrund unterschiedlicher Oberflächenkrümmungen unsymmetrisch durch das optische System. Dadurch entsteht anstelle eines scharfen Beugungsscheibchens eine unscharfe Bildkurve.

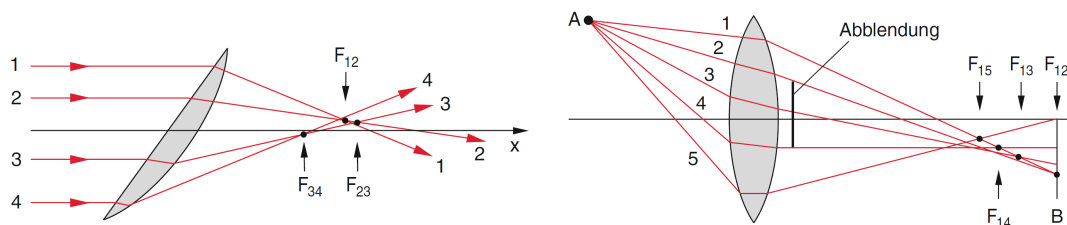


Abb. 10: Strahlengang bei Koma. (Bildquelle: W. Demtröder, Experimentalphysik 2 „Elektrizität und Optik“, 6. Auflage, Springer-Verlag)

Astigmatismus schiefer Bündel

Astigmatismus tritt auf, wenn ein Lichtbündel schräg auf die Linse trifft (siehe Abb. 11). Durch den unsymmetrischen Verlauf zur optischen Achse entsteht dieser Fehler. Dabei wird zwischen zwei Arten von Strahlen unterschieden: Die Strahlen in der horizontalen Schnittebene (Sagittalebene) und die in der senkrechten Schnittebene (Meridionalebene). Da bei schrägem Einfall des Lichts auf die Linse unterschiedliche lokale Krümmungsradien in den jeweiligen Ebenen auftreten, werden Strahlen der Meridionalebene in einem anderen Bildpunkt, in der Bildweite b_M , als Strahlen der Sagittalebene, in der Bildweite b_S , abgebildet. Durch diese unterschiedlichen Brennweiten erscheint der Bildpunkt in den unterschiedlichen Weiten x_1 , b_M , x_2 , b_S oder x_3 nicht als Punkt, sondern in Form zweier Bildlinien und dadurch nicht mehr scharf (siehe Abb. ??).

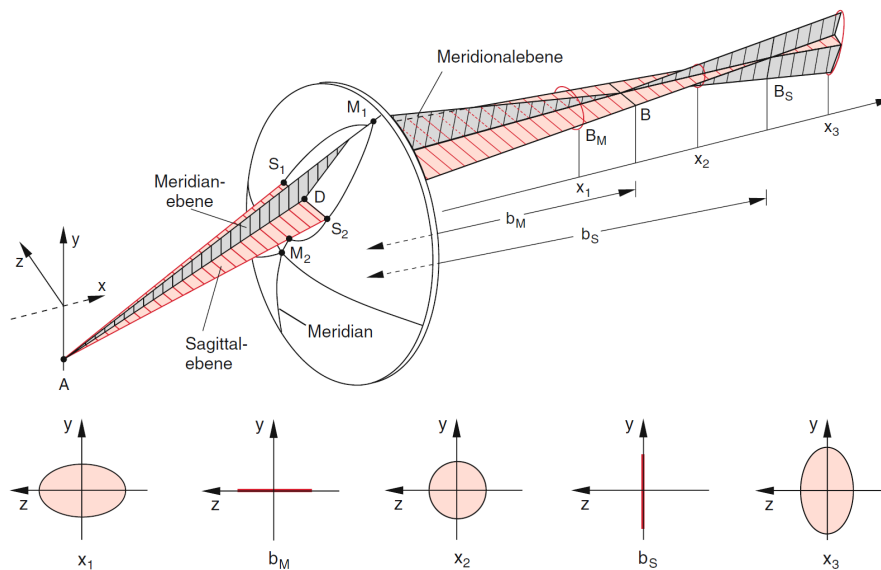


Abb. 11: Astigmatismus schiefer Bündel. (Bildquelle: W. Demtröder, Experimentalphysik 2 „Elektrizität und Optik“, 6. Auflage, Springer-Verlag)

Mikroskop

Ein Mikroskop besteht im einfachsten Fall aus zwei Linsen L_1 und L_2 . Die erste Linse stellt das Objektiv dar und entwirft ein reelles Zwischenbild, welches mit einem Schirm aufgefangen werden kann. Dieses Zwischenbild des Gegenstandes G befindet sich in der Brennebene der zweiten Linse, dem Okular. Durch das Okular gelangen parallele Strahlenbündel von jedem Punkt des Gegenstandes ins Auge, sodass ein vergrößertes virtuelles Bild des Gegenstandes im Unendlichen erscheint. Der Abstand zwischen den beiden Brennebenen der Linsen L_1 und L_2 wird als optische Tubuslänge T bezeichnet.

Unter Verwendung des Strahlensatzes und der Linsengleichung folgt analog zur Lupe für die Vergrößerung des Mikroskops V_M

$$V_M = \frac{b \cdot s_0}{f_1 \cdot f_2} \tag{8}$$

Die Länge s_0 beschreibt hierbei den Abstand von Gegenstand und Auge. Die Vergrößerung kann

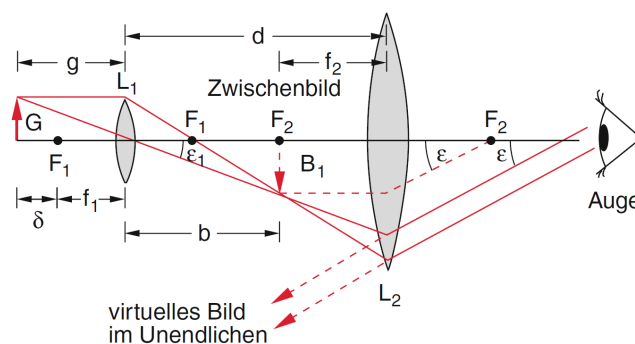


Abb. 12: Strahlengang am Mikroskop. (Bildquelle: W. Demtröder, Experimentalphysik 2 „Elektrizität und Optik“, 6. Auflage, Springer-Verlag)

auch als Produkt der Einzelvergrößerungen von Objektiv und Okular geschrieben werden

$$V_M = V_{\text{Objektiv}} \cdot V_{\text{Okular}} \quad (9)$$

Da F_1 sehr klein ist, gilt $b \approx T$. Damit kann die Vergrößerung als

$$V_M = \frac{s_0 \cdot T}{f_1 \cdot f_2} \quad (10)$$

ausgedrückt werden.

Abbesche Theorie der Abbildung

Für die Abbildung eines Nichtselbstleuchters spielt Beugung eine entscheidende Rolle. Beispielhaft für einen Nichtselbstleuchter sind bei Spalte S_1 und S_2 , die sich im Abstand d zueinander befinden. Werden diese mit parallelem Licht beleuchtet, erscheint die nullte Beugungsordnung in Richtung des durchgehenden Lichts. Erst die höheren Beugungsordnungen geben jedoch Auskunft über den Abstand d . Es gilt

$$m \cdot \lambda = d \cdot \sin(\alpha), \quad (11)$$

wobei $m = 1, 2, \dots$ die Beugungsordnung ist. Diese Situation ist in Abb. 13 gezeigt. Zur Entstehung der Bilder B_1 und B_2 werden die $+1$. und die -1 . Beugungsordnung benötigt. Daraus folgt, dass die Objektivlinse L_1 des Mikroskops mindestens das Licht der ± 1 . Beugungsordnung unter dem Winkel θ_1 noch erfassen können muss, d.h. die numerische Apertur NA muss mindestens

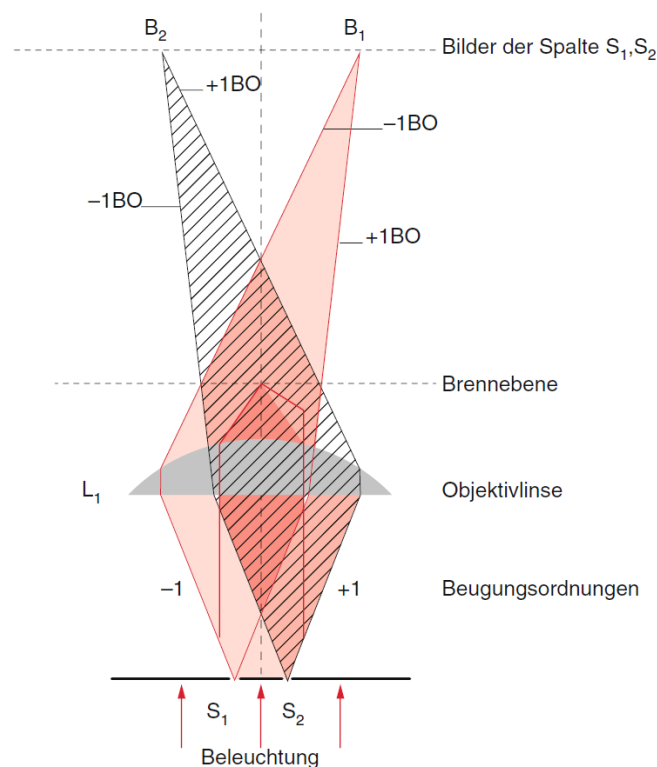


Abb. 13: Abbesche Theorie der Abbildung. (Bildquelle: W. Demtröder, Experimentalphysik 2 „Elektrizität und Optik“, 6. Auflage, Springer-Verlag)

$$\text{NA} = n \cdot \sin(\alpha) > n \cdot \sin(\theta_1) = \frac{\lambda}{d} \quad (12)$$

sein, um die räumliche Auflösung zu erreichen. Daraus ergibt sich

$$d \geq \frac{\lambda}{n \cdot \sin(\alpha)} = \frac{\lambda}{\text{NA}} \quad (13)$$

Durch Verwendung von Immersionsöl mit Brechungsindex n lässt sich die numerische Apertur vergrößern.

Vorbereitende Aufgaben

Berechnen Sie in Vorbereitung auf den Versuch die folgenden Aufgaben:

1. Leiten Sie ausgehend von Abb. 2 das Snelliussche Brechungsgesetz aus dem Fermatschen Prinzip her.
2. Leiten Sie die Abbildungsgleichung mit Hilfe des Strahlensatzes her.
3. Leiten Sie die Winkelvergrößerung des Mikroskops her.

Experiment

Versuchsaufbau

Der Versuch ist wie in Abb. 14 dargestellt aufgebaut. Auf einer optischen Bank können in ihren Halterungen die Lampe, Linsen und der Schirm positioniert und auf einer gemeinsamen Achse verschoben werden. Als Gegenstände dienen verschiedene Dias (Loch, Gitter, Mikrometerskala, Pfeil, . . .), die in einen Diahalter gesteckt werden können. Am Ende der optischen Bank befindet sich der Schirm. Zudem liegen am Versuchsplatz Sammell- und Zerstreuungslinsen aus (L_0 ($f = 50 \text{ mm}$) sowie $L_1 - L_4$), die auf die optische Bank zwischen Lampe und Schirm gesetzt werden können. Mit Hilfe von Farbfiltern (grün, blau, rot) kann die Abbildung für bestimmte Wellenlängen separat betrachtet werden. Mit zwei Blenden können bestimmte Bereiche der Lichtstrahlen abgedeckt werden.

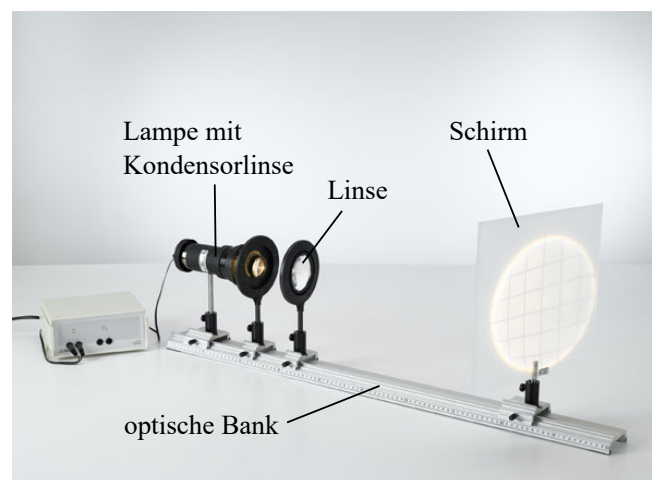


Abb. 14: Versuchsaufbau zum Versuch „Geometrische Optik“. Auf einer optischen Bank können in ihren Halterungen die Lampe, Linsen und der Schirm positioniert werden. Als Gegenstände dienen verschiedene Dias, die auf die Kondensorlinse gesteckt werden können. (Bildquelle: Leybold Didactic, modifiziert)

Befestigen Sie vor dem Versuch die Kondensorlinse an der Lampe und platzieren Sie diese am Ende der optischen Bank. Stellen Sie den Schirm in ca. 100 cm Abstand zur Lampe auf. Die verwendeten Dias können auf die Kondensorlinse gesteckt werden. Dabei ist auf eine gute Beleuchtung des Dias zu achten. Schieben Sie die Glühwendel dazu so dicht wie möglich an das Dia heran.

Graphische Brennweitenbestimmung

Zur Auswertung soll in einigen Versuchsteilen, in denen eine Brennweite bestimmt werden soll, zusätzlich zum Besselschen Verfahren die Brennweite graphisch bestimmt werden. Eine beispielhafte graphische Auswertung ist in Abb. 15 dargestellt. Hierzu wird jeweils der Mittelwert aus den fünf Messungen für die Bildweite auf die eine Achse mit den dazugehörigen Mittelwert für die Gegenstandsweite auf der anderen Achse verbunden. Aus der Abbildungsgleichung folgt, dass alle Geraden und die Winkelhalbierende des ersten Quadranten sich in einem Punkt schneiden. Dieser Schnittpunkt entspricht der Brennweite, welche sowohl auf der x -Achse als auch auf der y -Achse abgelesen werden kann. Da sich die Geraden durch Ableseungenauigkeiten in der Praxis nicht in einem Punkt treffen, werden die Schnittpunkte sowohl auf der x -Achse als auch auf der y -Achse abgelesen. Aus allen Werten ist der Mittelwert zu bilden.

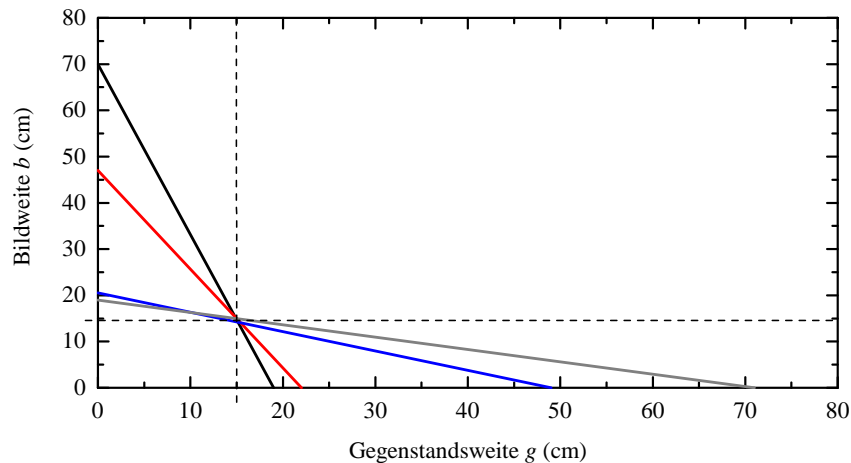


Abb. 15: Abbildung zur beispielhaften graphischen Brennweitenbestimmung.

Versuchsaufgaben

1. Bestimmung der Brennweite an Sammellinsen

Bestimmen Sie die Brennweite einer Sammellinse Ihrer Wahl (ausgenommen Linse L_0) mit dem Besselschen Verfahren. Verwenden Sie als Gegenstand das Pfeildia und schätzen Sie dessen Position ab. Messen Sie für die Bestimmung der Brennweite die Positionen der Linse, an denen eine scharfe Abbildung des Pfeildias entsteht. Messen Sie für jeden Abstand die Positionen für Verkleinerung und Vergrößerung jeweils fünfmal. Dabei bietet es sich an, jeweils fünfmal die Position der Vergrößerung und anschließend fünfmal die Position der Verkleinerung zu messen. Beachten Sie, dass der Pfeil bei der Verkleinerung sehr klein und dadurch schwer zu erkennen sein kann. Bestimmen Sie die Brennweiten über Gl. (7) und diskutieren Sie Ihre Ergebnisse. *Was muss für den Abstand a beim Besselschen Verfahren gelten, damit zwei scharfe Abbildungen entstehen?*

2. Bestimmung der Brennweite einer Zerstreuungslinse

Bestimmen Sie die Brennweite einer Zerstreuungslinse, indem Sie ein geeignetes Linsensystem aus einer Zerstreuungslinse und der Sammellinse L_0 aufbauen. Ermitteln Sie dann zunächst die Gesamtbrennweite des Linsensystems f . Die Brennweite der Sammellinse L_0 beträgt 50 mm und der Abstand d zwischen den beiden Hauptebenen der Linsen beträgt $d = 2$ cm. Gehen Sie zum Bestimmen der Gesamtbrennweite wie im 1. Versuchsteil vor. Die Brennweite der Zerstreuungslinse kann dann über Gl. (6) bestimmt werden. *Warum kann die Brennweite einer Zerstreuungslinse nicht so bestimmt werden wie bei Sammellinsen? Wie groß muss die Brennweite der Sammellinse sein, damit die Brennweite der Zerstreuungslinse bestimmt werden kann?*

3. Chromatische Aberration

In diesem Versuchsteil wird der Linsenfehler der chromatischen Abberation untersucht. Bilden Sie dazu zunächst mit Linse L_2 das Spaltdia scharf auf dem Schirm ab. Verdrehen Sie nun den Schirm um etwa 20° , sodass die Lichtstrahlen schräg auf den Schirm treffen. Beschreiben Sie das so entstandene Bild auf dem Schirm und erklären Sie die Veränderung des Bildes gegenüber dem Fall des nicht verdrehten Schirms.

Untersuchen Sie nun den Zusammenhang zwischen Brechung und Farbe bei der chromatischen Abberation. Bringen Sie dazu nacheinander den roten und den blauen Farbfilter zwischen Gegenstand und Linse in den Strahlengang und bestimmen Sie die beiden Farben die Brennweite wie im 1. Versuchsteil. Messen Sie fünf Mal die Gegenstandsweite für Vergrößerung und Verkleinerung. Bestimmen Sie die Brennweite zusätzlich graphisch. Vergleichen und diskutieren Sie Ihre Ergebnisse für die beiden Farbfilter.

4. Sphärische Aberration

In diesem Versuchsteil wird der Linsenfehler der sphärischen Abberation untersucht. Verwenden Sie dazu als Gegenstand das Gitterdia. Verringern Sie den Abstand zwischen Gegenstand und Schirm. Am Versuchsplatz liegen zwei Blenden aus, mit denen das Verhalten von achsennahen und achsenfernen Strahlen getrennt voneinander untersucht werden kann. Bringen Sie die Blenden nacheinander an und bestimmen Sie mit dem Verfahren aus Versuchsteil 1 die Brennweite für achsennahe und achsenferne Strahlen. Nehmen Sie zusätzlich eine graphische Bestimmung der Brennweiten vor. Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse.

5. Koma

In diesem Versuchsteil wird der Linsenfehler Koma untersucht. Bilden Sie dazu zunächst mit Linse L_2 das Lochdia mit regelmäßigen Abständen scharf auf dem Schirm ab. Betrachten Sie das entstehende Bild. Beschreiben und diskutieren Sie die Form der abgebildeten Löcher am Rand und in der Mitte. Verdrehen Sie nun die Linse um etwa 20° . Beschreiben Sie das so entstandene Bild auf dem Schirm und erklären Sie die Veränderung des Bildes gegenüber dem Fall der nicht verdrehten Linse.

6. Mikroskop

Bauen Sie aus den vorhandenen Linsen ein Mikroskop mit einer mindestens zwanzigfachen Vergrößerung auf. Verwenden Sie als Gegenstand das Dia mit der Mikrometerskala. Nehmen Sie das reelle Zwischenbild mit dem Schirm auf und betrachten Sie es mit der Lupe L_4 . Klemmen Sie zur Betrachtung des Zwischenbilds eine Millimeterskala an den Schirm, damit Sie die Größe des virtuellen Bildes abschätzen können. Betrachten Sie dazu das Bild in deutlicher Sichtweite (etwa 25 cm) vom Schirm. Messen Sie für drei verschiedene Gegenstands- und Bildweiten die jeweilige Vergrößerung. *Welche Linse wurde als Objektiv verwendet und welche als Okular? Begründen Sie diese Auswahl.*