

Ferienkurs Experimentalphysik 3

Geometrische Optik

Qi Li, Bernhard Loitsch, Hannes Schmeiduch

Dienstag, 06.03.2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Das Huygensche Prinzip	2
3	Optische Abbildungen	3
3.1	Virtuelle und reelle Abbildungen	3
3.2	Sammel- und Streulinsen	4
3.2.1	Sammellinse	4
3.2.2	Streulinse	5
3.3	Linsengleichung	5
3.4	Vergrößerung	6
4	Dicke Linsen und Linsensysteme	7
5	Optische Instrumente	9
5.1	Teleskope	9
5.2	Mikroskop	11
5.3	Bildhelligkeit	11
5.4	Auflösungsvermögen	12
6	Abbildungsfehler	12
6.1	Sphärische Aberration	13
6.2	Chromatische Aberration	13
6.3	Astigmatismus	14

1 Einleitung

Die geometrische Optik ist eine Näherung in der Optik, in der die Welleneigenschaften des Lichtes vernachlässigt werden. Dies ist möglich, weil die Wellenlänge des Lichtes klein im Vergleich zu den mit dem Licht wechselwirkenden Strukturen ist. Solche Strukturen sind zum Beispiel Spiegel oder Linsen. Die Grundlage der geometrischen Optik basiert auf dem Fermatschen Prinzip. Dieses Prinzip besagt, dass Licht in einem Medium zwischen zwei Punkten immer Wege nimmt bei denen sich die Laufzeit bei kleinen Variationen kaum ändert. In diesem Fall sprechen wir von stationären Wegen. Das bedeutet einfach, dass Licht immer den optisch kürzesten Weg nimmt. Aus dem Fermatschen Prinzip lassen sich folgende Annahmen herleiten:

- In einem optisch homogenem Medium sind Lichtstrahlen immer Geraden
- Treffen Lichtstrahlen auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien, werden sie nach dem Reflexionsgesetz reflektiert und nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz gebrochen

Eine weitere generelle Annahme in der geometrischen Optik ist die Kleinwinkelnäherung bei der $\sin x \approx x$ gilt. Diese Annahmen gelten natürlich nicht mehr bei nichtlinearen optischen Phänomenen.

2 Das Huygensche Prinzip

Ein weiteres sehr nützliches Prinzip ist das Huygensche Prinzip. Es ist eine einfache Methode zur Vorhersage des Verlaufs von Lichtstrahlen. Es besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer neuen Welle, der so genannten Elementarwelle, betrachtet werden kann. Die Art der neuen Welle hängt von der Anzahl der betrachteten Dimensionen ab.

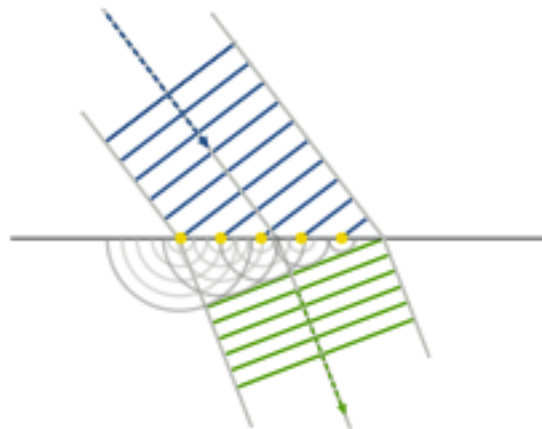


Abbildung 1: Erzeugung von Kugelwellen

In drei Dimensionen ist die neue Welle eine Kugelwelle, in zwei eine Zylinderwelle. Das ganze sind jedoch nur halbe Kugeln, bzw. Halbkreise, damit es keine

rückwärts laufende Welle gibt. Diese würde mit der Ursprünglichen Welle überlagern und zur Entstehung einer stehenden Welle führen.

Die Lage der neuen Wellenfront ergibt sich dann durch Superposition sämtlicher Elementarwellen. Damit kann man nun die Fortpflanzung von Wellenfronten erklären. Wenn man jetzt noch die unterschiedliche Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien berücksichtigt, dann kann man auch das Phänomen der Brechung beschreiben. Ebenso kann man mit dem Huygenschen Prinzip Beugungseffekte an Aperaturen erklären.

3 Optische Abbildungen

Um die Funktionsweise von optischen Instrumenten zu verstehen, ist es zuerst sinnvoll, sich die Allgemeinen Eigenschaften von optischen Systemen zu verdeutlichen. Die Grundlage dafür ist, dass jeder Gegenstand Lichtstrahlen reflektiert, die von unserem Auge rekonstruiert werden können. Das Ziel vieler optischer Anordnungen ist eine optische Abbildung. Eine optische Abbildung ist die Erzeugung eines Bildes in einem Bildpunkt durch die Vereinigung von Licht, das von einem Punkt eines Gegenstands ausgeht.

3.1 Virtuelle und reelle Abbildungen

Bei der optischen Abbildung müssen wir zwischen zwei Arten unterscheiden. Eine reelle oder eine virtuelle Abbildung. Dazu schauen wir uns das einfachste abbildende System an - einen ebenen Spiegel. Dieser ist das einzige optische Element, das eine ideale Abbildung in dem Sinne erzeugt, dass jeder Punkt des Raumes in einen anderen Punkt abgebildet wird. Einem Beobachter der vor

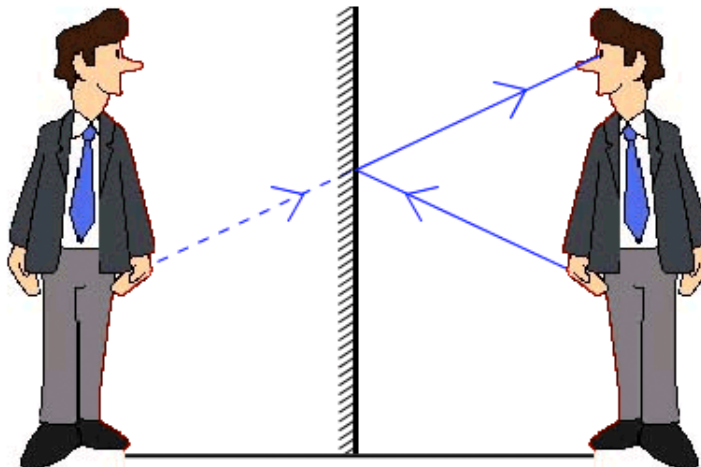


Abbildung 2: Strahlengang ebener Spiegel

dem Spiegel steht erreicht genau die gleiche Wellenfront, als wenn sich der Gegenstand im gleichen Abstand hinter dem Spiegel befinden würde. Anhand von

Abbildung 2 kann man nun erkennen, dass der Spiegel ein völlig verzerrungsfreies Bild im Maßstab von 1:1 erzeugt. Dieses Bild ist ein virtuelles Bild, denn es kann nicht auf einem Schirm abgebildet werden. Von dem Ort des virtuelles Bildes gehen keine Lichtstrahlen aus. Trotzdem denkt unser Auge das die Strahlen vom Bild zu kommen scheinen, da unsere Wahrnehmung Lichtsstrahlen als geradlinig unterstellt.

Im Gegensatz zu dem virtuellen Bild gibt es auch ein reelles Bild. Bei diesem Bild können die reflektierten Lichtstrahlen eines Objektes auf einem Schirm abgebildet werden. Das bedeutet, dass von dem Ort des realen Bildes wirklich Lichtstrahlen ausgehen oder das die vom Gegenstand ausgehenden Strahlen sich dort getroffen haben und wieder auseinander gehen. Reelle Bilder haben wir zum Beispiel bei Lochkamas oder bei dem Bild auf dem Bildschirm eines Fernsehgerätes.

3.2 Sammel- und Streulinsen

Die Hauptbauelemente von optischen Systeme sind Linsen. Hierbei unterscheiden wir zwischen Konvex- und Konkavlinen, wobei erstere auch Sammellinsen und letztere Streulinsen genannt werden.

3.2.1 Sammellinse

Eine Sammellinse ist eine sphärische Linse mit positiver, vergrößernder Brechkraft. Fällt eine ebene Wellenfront auf die Linse, so werden die Strahlen in der Brennebene gesammelt. Bei einer ebenen Wellenfront spricht man auch von parallelen Lichtstrahlen. Im Fall von parallel zur optischen Achse eingestrahlem

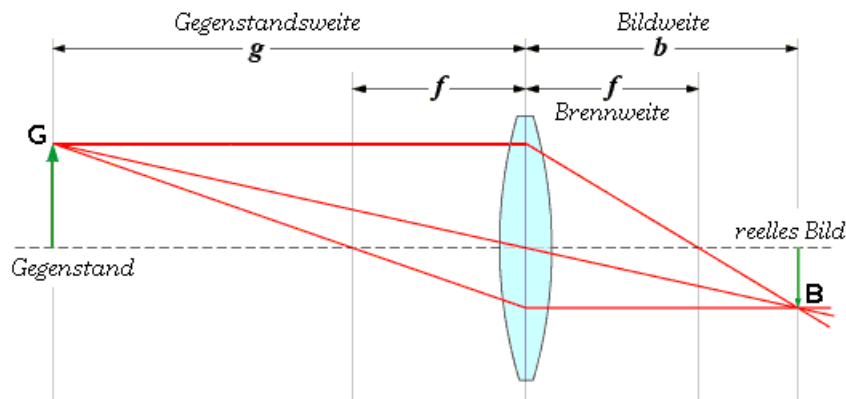


Abbildung 3: Entstehung eines reelles Bild

Licht kommt es sogar zur fokussierung im Brennpunkt der Linse. Das bedeutet, dass eine Sammellinse aus einem parallelen Lichtbündel konvergente Strahlen macht, wodurch sie ein reelles Bild erzeugen kann. Generell kann eine Sammellinse ein reelles sowie ein virtuelles Bild erzeugen. Welches Bild entsteht hängt einfach von dem Abstand des Gegenstandes zur Linse ab. Befindet sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite, also ist $g < f$, so entsteht ein virtuelles Bild

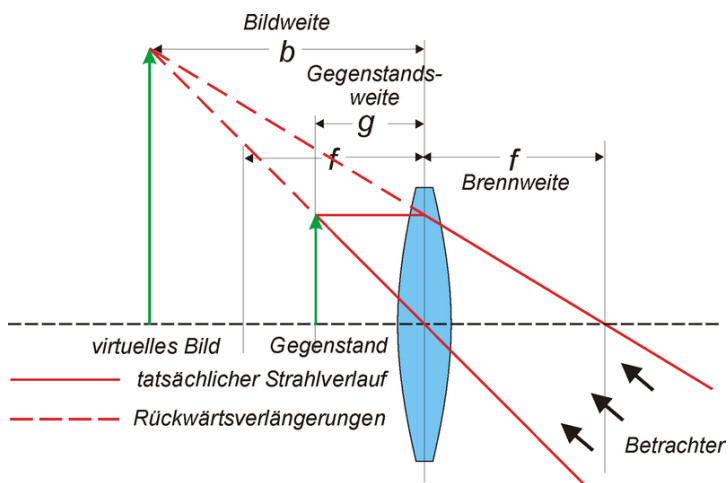


Abbildung 4: Entstehung eines virtuelles Bildes

auf der gleichen Seite des Gegenstandes. Diesen Fall können wir in Abbildung 4 sehen. Ein Beobachter sieht eine Wellenfront von einem Objekt was größer und weiter weg von der Linse entfernt steht. Die Linse wirkt also als Lupe.

Im Gegensatz dazu kommt es zur Entstehung eines reellen Bildes, wenn der Gegenstand innerhalb der Brennweite der Sammellinse steht, also $g \geq f$. Je nach dem Verhältnis von Brennweite und Gegenstandsweite kann dieses Bild verkleinert, gleich groß oder vergrößert sein. Dieser Fall ist in Abbildung 3 dargestellt.

3.2.2 Streulinse

Im Falle von Streulinsen kommt es nur zur Entstehung von virtuellen Bildern, da sich die gebrochenen Strahlen nicht schneiden, wie beim reellen Bild. Da hier der Krümmungsradius in die andere Richtung zeigt, spricht man auch von einer negativen Brennweite.

3.3 Linsengleichung

Bei den oben beschriebenen Linsen handelt es sich um sogenannte dünne Linsen. Hier wird die Dicke einer Linse vernachlässigt und es kommt zur Brechung von Lichtstrahlen an zwei sphärischen Grenzflächen. Im Falle einer dünnen Linse können diese beiden Brechvorgänge zu einem effektiven Brechvorgang an der Mittelebene der Linse zusammengefasst werden. Trifft jetzt ein Lichtstrahl auf den Mittelpunkt der dünnen Linse (Schnittpunkt Linse mit opt. Achse) dann geht dieser ungebrochen hindurch. Das ganze ist natürlich nur eine Näherung, welche aber für große Brennweite gut erfüllt ist.

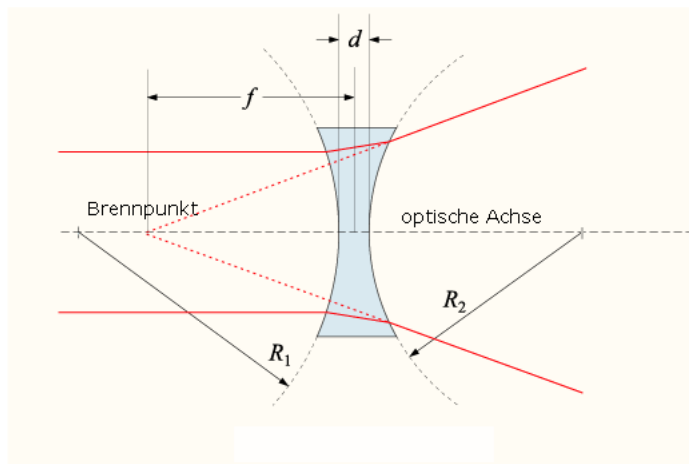


Abbildung 5: Bildentstehung Streulinse

Um nun die Brennweite einer dünnen Linse zu berechnen, bedienen wir uns der Abbildungsgleichung für solche:

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

Diese Gleichung gilt bei allen optischen Systemen und bildet die Grundlage der geometrischen Optik. Die Herleitung dieser Gleichung lässt sich relativ einfach mit geometrischen Methoden nachvollziehen, auf diese hier aber verzichtet wird. f ist die Brennweite, g die Gegenstandsweite (Abstand Gegenstand - Linse) und b ist die Bildweite (Abstand Bild - Linse) Allgemein ist es nützlich, eine Vorzeichenkonvention einzuführen.

Größen	Positiv	Negativ
g	links	rechts
b	rechts	links
f_g	links	rechts
f_b	rechts	links
R	rechts	links

3.4 Vergrößerung

Wie in Abschnitt 3.2.2 erwähnt wurde, kann es zur Entstehung unterschiedlicher großer Bilder kommen. Für die Vergrößerung eines Bild gilt folgende Definition:

$$V = \frac{B}{G} = \frac{\tan\alpha_1}{\tan\alpha_2} \approx \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (2)$$

α_1 beschreibt hier den Betrachtungswinkel ohne Hilfsmittel, α_2 mit Hilfsmittel. Der erste Teil der Formel ist natürlich offensichtlich. Wenn man die Größe des Bildes durch die Größe des Gegenstandes teilt, erhält man die Vergrößerung. Der letzte Schritt gilt immer für achsennahe Strahlen. Im Falle einer Sammellinse kann man das ganze auf die Bild- und Gegenstandsweite zurückführen. Also gilt:

$$\frac{B}{G} = -\frac{b}{g} = -\frac{f-g}{g} \quad (3)$$

Für den letzten Schritt muss man einfach die Abbildungsgleichung einsetzen. Außerdem folgt aus der Abbildungsgleichung:

$$\frac{1}{g} = \frac{b-f}{bf} \rightarrow V = \frac{b}{g} = \frac{b-f}{f} \quad (4)$$

Wenn man jetzt zum Beispiel die Vergrößerung einer Lupe berechnen will, die dann natürlich vom Abstand des Auges abhängt, muss man sich einen Referenzpunkt definieren. Hierzu nimmt man die deutliche Sehweite $s_0 = 25\text{cm}$. Sie definiert den minimalen Abstand eines scharf sichtbaren Objekts vom Auge. Alle Objekte die sich näher am Auge befinden, können nicht scharf abgebildet werden.

Somit gilt für den Betrachtungswinkel:

$$\tan \alpha_1 = \frac{G}{s_0}$$

Ein weiterer Trick, der auch beim Telekop nützlich sein wird, ist es die Gegenstandsweite $g = \infty$ zu setzen. Ein Gegenstand der im unendlichen steht lässt sich am einfachsten beobachten, weil dann das Auge komplett entspannt ist. Aus diesem Grund wählen wir den Abstand zwischen der Lupe und dem Gegenstand so, dass er unendlich weit entfernt erscheint, also wenn die Gegenstandsweite gleich der Brennweite ist.

$$\tan \alpha_2 = \frac{G}{f}$$

Eingesetzt in Gleichung 2 erhalten wir jetzt für die Vergrößerung:

$$V = \frac{G/f}{G/s_0} = \frac{s_0}{f} = \frac{25\text{cm}}{f} \quad (5)$$

Die Vergrößerung für andere optische Systeme werden bei den optischen Instrumenten bearbeitet.

4 Dicke Linsen und Linsensysteme

In den meisten Fällen verwendet man nun aber statt einer einzelnen dünnen Linse ein komplettes System aus dünnen Linsen. Eine optimale Kombination verschiedener Linsen kann die Qualität der Abbildung wesentlich verbessern. Eine genauere Betrachtung dieser Probleme wird in Kapitel 6 vorgenommen. Bei einem System aus dünnen Linsen kann man auch wieder die Linsengleichung

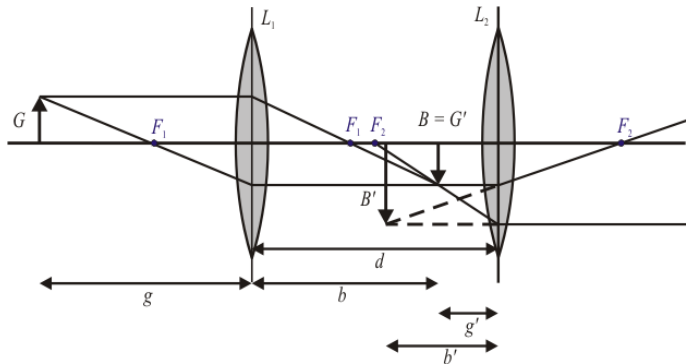


Abbildung 6: System aus zwei Linsen mit Abstand größer als die Brennweiten

(1) verwenden. Es lässt sich eine Gesamtbrennweite f des Systems berechnen. Dazu muss man jedoch die Bild- und Gegenstandsweite anpassen. Dazu wird die Bildweite der ersten Linse berechnet und mit der Formel (1) als Gegenstandsweite für die nächste Linse verwendet. Diesen Prozess kann man für beliebig viele Linsen fortsetzen. Als Beispiel sei hier der Fall für zwei Linsen aufgeführt. Es ergibt sich eine Gesamtbrennweite des Linsensystems von:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \tag{6}$$

Die Brennweiten f_i entsprechen der Brennweite der jeweiligen Linse und d ist der Abstand zwischen diesen. Wenn der Abstand der Linsen sehr klein im Vergleich zu den Brennweiten ist, also $d \ll f_1$ und $d \ll f_2$ dann können wir den letzten Term vernachlässigen. Das bedeutet, dass sich die reziproken Brennweiten zweier nahe benachbarter Linsen einfach addieren.

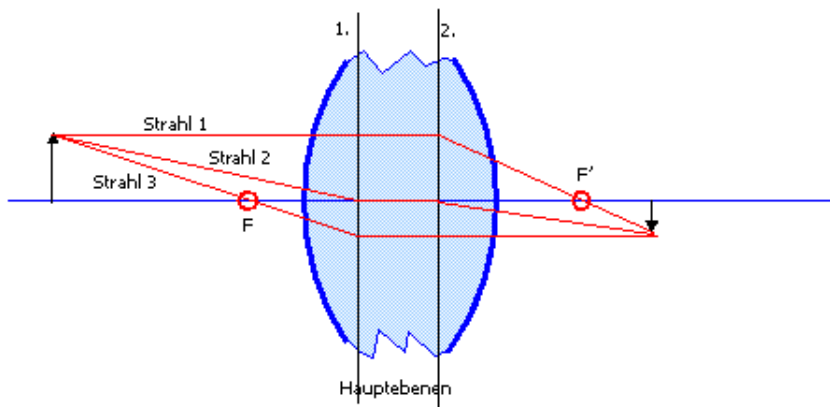


Abbildung 7: dicke Linse mit Hauptebenen

Bis jetzt waren die verwendeten Linsen sehr dünn und man konnte die Ausdehnung dieser vernachlässigen. Für dicke Linsen gilt diese Annahme nicht. Diese bestehen aus einer einzelnen Linse, deren beide Seite soweit voneinander entfernt sind, dass sie als ein Linsensystem aus zwei gekrümmten Flächen gilt. Wichtig ist es zu beachten, dass sich zwischen diese beiden Flächen ein Medium mit einem Brechungsindex n befindet. Dadurch verändert sich die Formel (6) zu:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d}{nR_1R_2} \right) \quad (7)$$

Es gilt zu beachten, dass die Gegenstandsweite g bis zu ersten Hauptebene H_1 und die Bildweite b von der zweiten Hauptebene H_2 gemessen wird. d ist die dicke der Linse und R_1 und R_2 sind die Krümmungsradien der beiden Grenzflächen.

Die einfache Strahlenkonstruktion der dünnen Linsen würde bei dicken Linsen zu größeren Fehlern führen. Um nun trotzdem eine ähnlich einfache Strahlenkonstruktion bei dicken Linsen zu ermöglichen, führt man die Hauptebenen H_1 und H_2 ein. Diese Hauptebenen sind in Abbildung 7 mit 1. und 2. eingezeichnet. Man verlängert einfach den einfallenden und den austretenden Strahl geradlinig bis zu den Schnittpunkten mit diesen Ebenen. Dadurch kann man die Strahlbrechungen an den Linsengrenzflächen durch Brechungen an den zwei Hauptebenen ersetzen. Mit diesem System ersetzt man einfach die dicke Linse durch zwei dünne Linsen in den Hauptebenen H_1 und H_2 . Für den Abstand der Hauptebenen zu den Schnittpunkten der Linsengrenzflächen mit der Symmetrieachse erhält man:

$$h_1 = -\frac{(n - 1)fd}{nR_2} \quad (8)$$

$$h_2 = -\frac{(n - 1)fd}{nR_1} \quad (9)$$

Auch hier gilt wieder eine Vorzeichenkonvention. $h_i > 0$ wenn H_i rechts von S_i liegt und $h_i < 0$ wenn H_i links von S_i

5 Optische Instrumente

Die vorherigen Kapitel finden nun Anwendung in optischen Instrumenten aller Art.

5.1 Teleskope

Bei einem Teleskop verwendet man zwei verschiedene Linsen mit unterschiedlicher Brennweite. Die Linse mit hoher Brennweite ist das Objektiv, die mit geringer Brennweite ist das Okular. Der Sinn eines Teleskops ist die Betrachtung von weit entfernten Objekten. Aus diesem Grund kann man in sehr guter

Näherung die Gegenstandsweite auf unendlich setzen. Dann erhalten wir aus Gleichung 1

$$f = b$$

Das Objektiv erzeugt jetzt ein reelles Bild in der Bildebene. Dieses wird dann durch das Okular für das menschliche Auge aufbereitet, so dass eine direkte Beobachtung möglich ist. Durch Änderung der Brennweite des Okulars lässt sich die Vergrößerung des betrachteten Objekts ändern.

Wegen der großen Gegenstandsweite trifft quasi eine ebene Welle auf das Tele-

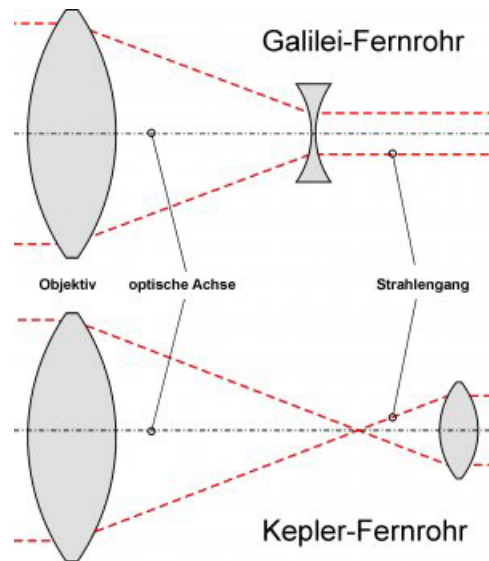


Abbildung 8: Strahlengang im Galileiischen und im Keplerschen Fernrohr

skop. Damit jetzt ein unverfälschtes reelles Bild entsteht, muss auch eine ebene Welle das Teleskop verlassen. Dies erreicht man wenn der Abstand zwischen den beiden Linsen gerade der Summe aus deren Brennweiten entspricht.

In Abbildung 8 sind zwei mögliche Teleskopsysteme dargestellt. Haben beide Linsen eine positive Brennweite, also Sammellinsen, entspricht der Strahlengang dem Kepler-Fernrohr.

Die Vergrößerung des Teleskops lässt sich aus dem Quotient des Strahldurchmessers vor und nach dem System bestimmen. Dieser ist gleich dem Quotient aus den beiden Brennweiten bzw. gleich der Vergrößerung:

$$V = \frac{f_{\text{Objektiv}}}{f_{\text{Okular}}}$$

Das Bild des Kepler-Fernrohrs steht auf dem Kopf und ist seitenverkehrt. Wenn man jetzt eine Sammellinse durch eine Konkavlinse durch eine Linse mit negativer Brennweite, einer Streulinse, ersetzt, dann hat man ein Galilei-Fernrohr. Der Vorteil dieses Fernrohrs ist die Erzeugung eines aufrechten und seitenrichtigen Bildes. Der Nachteil ist das kleine Sehfeld und das fehlende Fadenkreuz (Baubedingt nicht möglich) was das Lokalisieren erschwert. Die maximale Vergrößerung eines Teleskops ist durch die Beugung des Lichts vom Objektivdurchmesser abhängig.

Die am meisten verbreitete Teleskopart sind Spiegelteleskope. Dieses besteht aus zwei sphärischen Spiegeln mit Krümmungsradien von mehreren Metern. Der Vorteil dieser Teleskope liegt auf der Hand. Es ist einfacher große Spiegel zu konstruieren als große Linsen. Je größer die Spiegel des Teleskops sind, desto höher ist die Lichtausbeute und desto besser ist die Abbildung des Gegenstandes. Ein weiterer Vorteil ist das keine chromatische Aberration auftreten kann. Damit kann man eine größere Bandbreite $\delta\lambda$ übertragen. Auf die Abbildungsfehler wird in Kapitel 6 eingegangen.

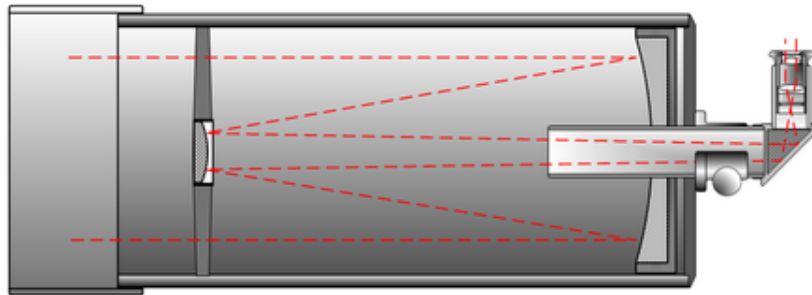


Abbildung 9: Strahlengang eines Spiegelteleskops

5.2 Mikroskop

Ein Mikroskop ist ein Gerät mit dem es möglich ist, Objekte zu vergrößern oder bildlich dazustellen. Die Gegenstandsweite ist im Gegensatz zu den Teleskopen deutlich kleiner als die Brennweite des System. Ein Objektiv, was wieder eine Sammellinse ist, erzeugt ein reelles Zwischenbild. Das Okular, welches beim Mikroskop immer eine Sammellinse ist, befindet sich in dem Abstand zum Objektiv das immer ein paralleles Strahlenbündel das Mikroskop verlässt. Das Auge sieht dadurch den betrachteten Gegenstand im unendlichen. Die Vergrößerung eines Mikroskops ist einfach aus dem Produkt der einzelnen Vergrößerungen von Objektiv und Okular gegeben.

$$V = V_{Okular} V_{Objektiv}$$

5.3 Bildhelligkeit

Ein wichtiger bisher unbeachteter Punkt ist die Helligkeit eines Erzeugten Bildes. Diese hängt natürlich von der gesammelten Menge des Lichtes durch das Objektiv/Linse ab. Die Helligkeit hängt im wesentlichen von der Größe der Linse und von ihrer Brennweite ab. Je größer eine Linse ist, desto größer ist die Fläche der Linse und somit kann auch mehr Licht eingesammelt werden. Je größer die Brennweite wird, desto größer wird der Abbildungsmaßstab, und das vorhandene Licht wird über eine größere Fläche verteilt. Damit folgt für die

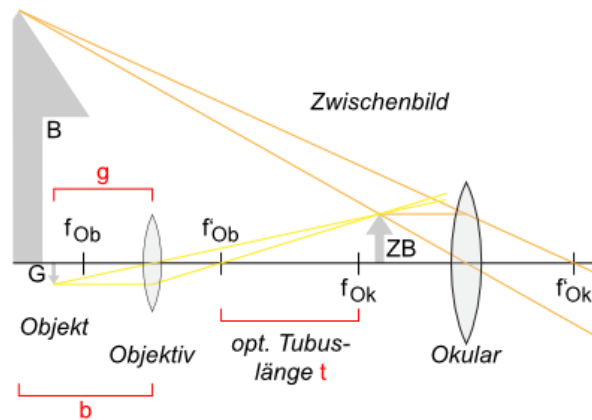


Abbildung 10: Strahlengang eines Mikroskops

Bildhelligkeit:

$$H \propto \frac{D^2}{f^2} \quad (10)$$

Das bedeutet man muss für ein helles Bild eine möglichst große Linse mit einer kleinen Brennweite verwenden. Die Formel für die Bildhelligkeit gilt allerdings nur für Gegenstandsweiten die deutlich größer als die Brennweite sind.

5.4 Auflösungsvermögen

Wie Anfangs erwähnt lässt man bei der geometrischen Optik die Welleneigenschaften des Lichts völlig außer Acht. Da eine Linse jedoch wie eine Kreisblende wirkt, tritt dort Beugung auf. Dadurch kommt es das ein Punkt nicht genau auf einen Punkt, sondern auf einem Beugungsmuster, abgebildet wird. Ein solches Muster von zwei nahe beieinander liegenden Punkten kann sich überlagern und führt damit zu einer Unschärfe.

Beide Punkte können nicht mehr genau von einander getrennt werden. Eine Trennung ist nur möglich, solange das Maximum des einen Punktes noch im ersten Minimum des anderen liegt. Das ist genau dann der Fall, wenn der Winkelabstand zwischen den beiden Punkten das Rayleigh-Kriterium erfüllt.

$$\alpha = \arcsin 1,22 \frac{\lambda}{d} \approx 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (11)$$

d beschreibt hier den Durchmesser der Blende, zum Beispiel der Öffnung eines Teleskops.

6 Abbildungsfehler

Durch die bisher gemachten Annahmen, welche nur bedingt gelten, kommt es zur Entstehung von Abbildungsfehlern.

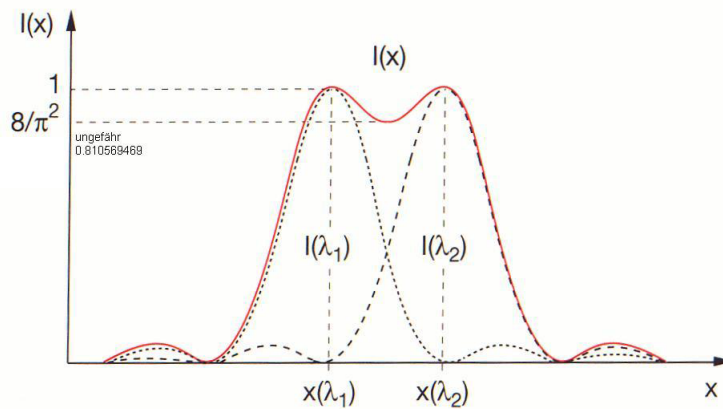


Abbildung 11: Beugungsmuster von zwei nahe beieinander liegenden Punkten

6.1 Sphärische Aberration

Eine der Hauptannahmen der geometrischen Optik ist die Kleinwinkelnäherung. Solange diese gilt werden alle Strahlen aus dem unendlichen an der Sammellinse gebrochen und im Brennpunkt fokussiert. Bei großen Öffnungen und kleinen Brennweiten allerdings ist diese Annahme nicht mehr gültig. Strahlen die sehr weit entfernt von der Symmetrieachse verlaufen werden stärker gebrochen als Strahlen die dicht an dieser verlaufen. Dies führt zur Entstehung einer "Brennlinie" anstelle eines Brennpunktes. Dieses Problem kann man nur vermeiden, in dem man kleinere Blende oder spezielle asphärische Linsen verwendet.

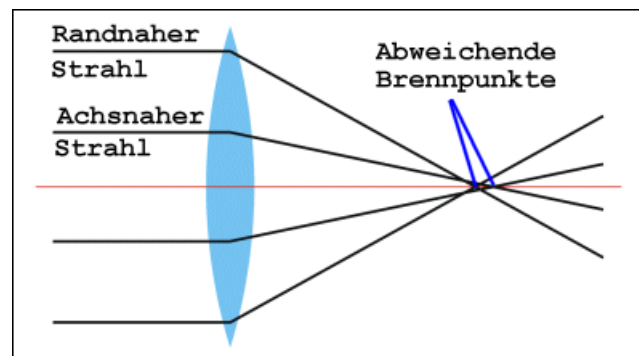


Abbildung 12: Sphärische Aberration

6.2 Chromatische Aberration

In den vorherigen Kapiteln wurde der Brechungsindex eines Mediums immer als Konstante angenommen. Dies gilt meistens nicht, denn der Brechungsindex $n(\lambda)$ ist eine Funktion von der Wellenlänge. Das heißt es kommt zur Dispersion. Licht mit unterschiedlichen Wellenlängen wird unter verschiedenen Winkeln

gebrochen. Das bedeutet, dass rotes Licht von einer Sammellinse auf einem anderen Brennpunkt abgebildet wird wie blaues Licht. Rotes Licht hat eine größere Wellenlänge und wird weniger gebrochen, weshalb die Brennweite von rotem Licht größer ist. Umgekehrt ist die Wellenlänge von blauem Licht kleiner, die Brechung stärker und somit die Brennweite kleiner. Chromatische Aberration erkennt man durch farbige Ränder in der Abbildungsebene.

Zur Vermeidung von Abbildungsfehlern verwendet man im Allgemeinen Linsensysteme. Im Falle von chromatischer Aberration plziert man nach der Sammellinse eine Linse mit kleinerer negativer Brennweite, also eine Streulinse. Wichtig ist das die Summe der beiden Brennweiten immer noch positiv ist. Der Brechungsindex der Streulinse muss so gewählt werden, dass die chromatische Aberration gerade aufgehoben wird, also blaues und rotes Licht wieder auf den gleichen Brennpunkt fokussiert werden.

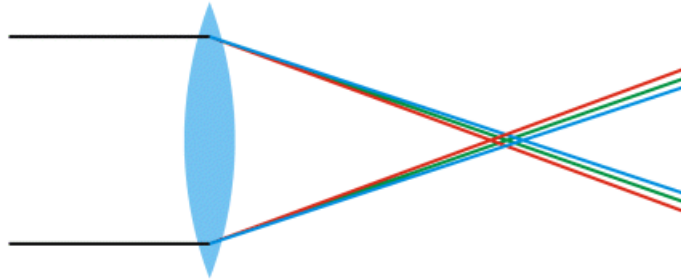


Abbildung 13: Chromatische Aberration

6.3 Astigmatismus

Ein weiterer Fehler ist der Astigmatismus. Dieser Abbildungsfehler tritt auf, wenn das optische Element von seiner idealen Kugelform abweicht. Dies macht eine scharfe Abbildung unmöglich. Wichtig ist dieser Effekt besonders in der Medizin, da die Linse unseres Auges einen solchen Fehler verursacht. Dies kommt oft durch eine zylinderische Deformation der Linse, wodurch sie in x-Richtung eine andere Brennweite aufweist als in y-Richtung. Ausgleichen kann man diesen Fehler durch Verwendung einer Brille oder Kontaktlinsen.