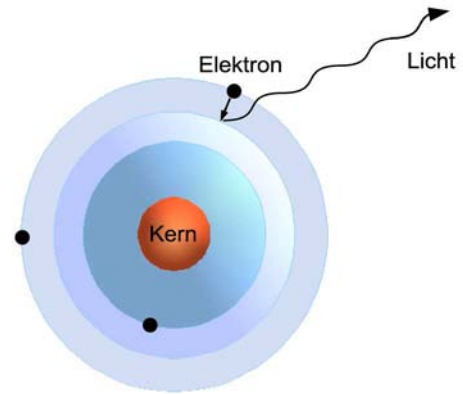




1.1 Optik

Die Optik befasst sich mit den Eigenschaften von Licht.

Diese entsteht durch Elektronenübergänge in einem Atom. Dabei werden Elektronen in einen höheren angeregten Energiezustand gehoben, manchmal so stark, dass die Elektronen ganz aus dem Atom entfernt werden. Die entstandenen Elektronenlücken werden mit Elektronen gefüllt, die aus den äußeren Schalen nachrücken. Diese Elektronen kommen damit auf einen niedrigeren Energiezustand und die freiwerdende Energie wird als Licht abgestrahlt. Die freiwerdende Energie kann nicht jede beliebige Gesamtmenge haben, sondern nur in Stufen (Quanten) zu- und abnehmen.



Das Anregen der Atome zur Lichtabstrahlung geschieht meistens durch Hitze (z.B. Flamme, Glühwendel).

1.1.1 Eigenschaften des Lichtes

Licht stellt eine elektromagnetische Welle dar, deren „Bausteine“ Photonen sind.

In der Physik bezeichnet man mit Photon (griechisch: phos = Licht) die elementare Anregung (Quant) des elektromagnetischen Feldes. Ein Photon ist jedoch kein „klassisches“ Teilchen. Photonen sind unendlich lang und haben eine fix definierte Frequenz und Wellenlänge sowie eine feste Energie die ausschließlich von der Wellenlänge abhängt.

Photonen als Bausteine elektromagnetischer Strahlung besitzen aber nicht nur die Eigenschaften einer Strahlung, sondern auch die einer Welle. Diese beiden Eigenschaften werden in den beiden großen Bereichen der Optik (**Strahlenoptik und Wellenoptik**) behandelt.

Licht stellt somit auch eine elektromagnetische Welle dar, die transversal (also senkrecht) zur Ausbreitungsrichtung schwingt.

Im Gegensatz zu transversal schwingenden Wellen gibt es auch noch Longitudinalwellen; das sind Wellen, die in Richtung ihrer Ausbreitung schwingen und auf ein Medium angewiesen sind. Wichtige Formen von Longitudinalwellen sind etwa Stoßwellen und Schallwellen.

Im Gegensatz zu longitudinalen Schallwellen können sich die transversale Lichtwellen daher auch ohne Materie also im Vakuum ausbreiten.

- Die Welleneigenschaft des Lichts wird durch die Intensität und Wellenlänge charakterisiert.
- Die Strahleneigenschaft hingegen durch die Richtung und die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Welle.



1.1.2 Strahlenoptik

In der Strahlenoptik oder geometrischen Optik steht die Strahleneigenschaft des Lichtes im Vordergrund. Das Licht wird als aus vielen Lichtstrahlen zusammengesetzt betrachtet.

Eine Lichtquelle sendet Lichtstrahlen divergent in alle Richtungen des Raumes aus, in homogenen Medien breiten sich diese geradlinig aus.

Die Geschwindigkeit des Lichtstrahls hängt von der Dichte des Mediums ab in dem er sich ausbreitet. Im Vakuum ist die Lichtgeschwindigkeit daher am höchsten und beträgt 299.792,458 km/s.



1

Die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist eine Naturkonstante und wird mit „ c “ bezeichnet; sie gibt nach Einsteins Relativitätstheorie die maximal erreichbare Geschwindigkeit an, die nicht nur von Licht, sondern auch von jeder anderen Form der Energie erreicht werden kann.

Strahlenoptik kann zur Erklärung von Brechung und Reflexion herangezogen werden, nicht jedoch für Interferenz, Beugung und Polarisation des Lichtes. Dazu wird das Wellenmodell des Lichts benötigt.

1.1.2.1 Lichtbrechung

Lichtstrahlen ändern an Grenzflächen von unterschiedlich dichten Medien ihre Richtung und ihre Geschwindigkeit. Bei der Richtungsänderung spricht man auch von Lichtbrechung.

Brechungsindex

ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Medium zur Vakuumlichtgeschwindigkeit

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = \text{const}$$

Brechungsindex (n):

- Luft: 1,0003
- Wasser: 1,333
- Quarzglas: 1,459
- Immersionsöl: ca. 1.515
- Flintglas: 1,613
- Diamant: 2,417

nBrechungsindex
 α, β ...Einfallswinkel

Hier ist anzumerken, dass Licht höherer Frequenz (bzw. kürzerer Wellenlänge) stärker gebrochen wird als Licht mit einer niedrigeren Frequenz.

1 <http://www.ccs.k12.in.us/chsPA/drama/Courses/TheatreHistoryProject06/p7/Medieval/lighting.htm>



Snelliussches Brechungsgesetz

Dieses besagt, dass ein Lichtstrahl seine Richtung ändert gebrochen wird wenn er in ein Medium mit anderer Dichte (Phasengeschwindigkeit) übergeht.

$$\sin \alpha : \sin \beta = n = c_1 : c_2$$

Das Gesetz besagt nur, in welche Richtung der Lichtstrahl abgelenkt wird, nicht aber, wie viel am Übergang zwischen den beiden Medien transmittiert bzw. reflektiert wird. Im Fall der Totalreflexion ist das reelle Brechungsgesetz ungültig.

n.....Brechungsindex
 c₁.....Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
 c₂.....Lichtgeschwindigkeit im Medium
 α, β...Einfallswinkel

Die Ein- bzw. Ausfallswinkel des Lichts werden dabei immer zum senkrecht auf die Mediengrenze stehenden Lot angegeben.

- Vom optisch dünnen ins optisch dichte Medium: Brechung **zum** Lot
- Vom optisch dichten ins optisch dünne Medium: Brechung **vom** Lot

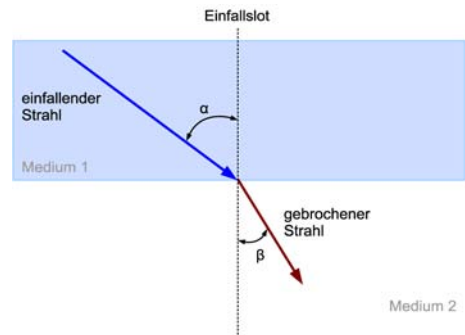
Brechung zum Lot

Eine Brechung zum Lot tritt beim Übergang des Lichtes von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium auf.(zB von Luft in Glas)

Der Einfallswinkel ist immer **größer** als der Ausfallswinkel!

$$\sin \alpha > \sin \beta$$

$$c_1 > c_2$$



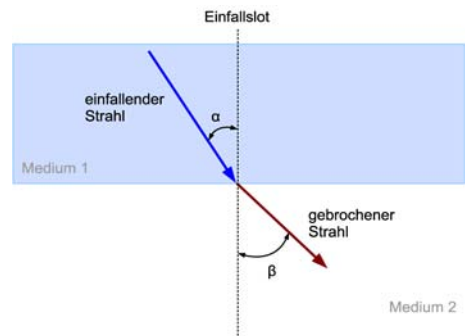
Brechung vom Lot

Beim Übergang von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium kommt es zu einer Brechung vom Lot.

Der Einfallswinkel immer **kleiner** als der Ausfallswinkel.

$$\sin \alpha < \sin \beta$$

$$c_1 < c_2$$

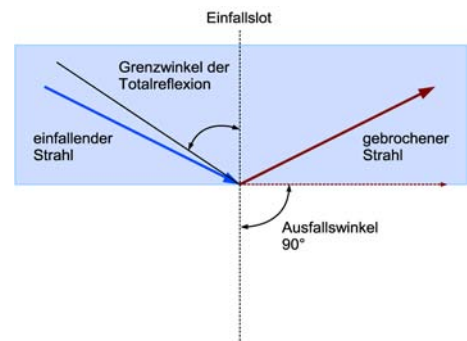




Sonderfall: Totalreflexion

Übersteigt der Einfallswinkel, beim Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium, einen bestimmten Wert (Grenzwinkel der Totalreflexion) kann keine Brechung mehr auftreten, da der Brechungswinkel maximal 90° (und der Sinus des Brechungswinkels maximal 1) betragen kann.

Bei allen Einfallswinkeln, die über diesem Grenzwert liegen, wird daher das gesamte Licht reflektiert; die Grenzfläche verhält sich in diesem Fall wie ein Spiegel. Man spricht daher von einer Totalreflexion.



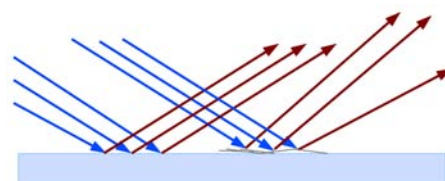
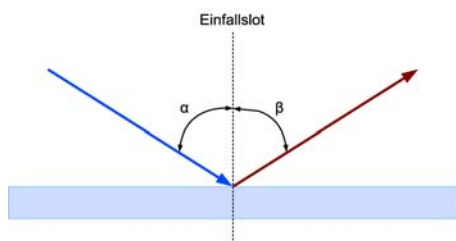
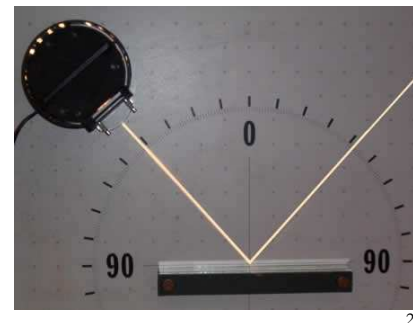
Totalreflexion wird z.B. in Umlenkprismen ausgenutzt; diese Glasprismen werden in Mikroskopen verwendet, um den Lichtstrahl in bestimmte Richtungen zu lenken.

Die Totalreflexion ist auch dafür verantwortlich, dass Diamanten funkeln. Das eintretende Licht tritt an vielen Stellen aus, wenn der Diamant richtig geschnitten ist.

1.1.2.2 Reflexion

An jeder Grenzfläche zwischen zwei Medien wird entweder ein Teil oder bei Totalreflexion das gesamte Licht reflektiert. Je nach Beschaffenheit der Oberfläche erfolgt diese Reflexion spiegelnd oder diffus. In jedem Fall gilt aber für jeden einzelnen Strahl das **Reflexionsgesetz**:

Einfallswinkel = Reflexionswinkel
$\alpha = \beta$



Bei senkrechtem Lichteinfall werden an metallischen Oberflächen ca. 90%, an Glasflächen gegen Luft ca. 4% reflektiert. Der Rest des Lichtes kann durchgelassen oder im Medium absorbiert werden.

2 http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph07_g8/grundwissen/02reflexionsgesetz/reflexion4.htm



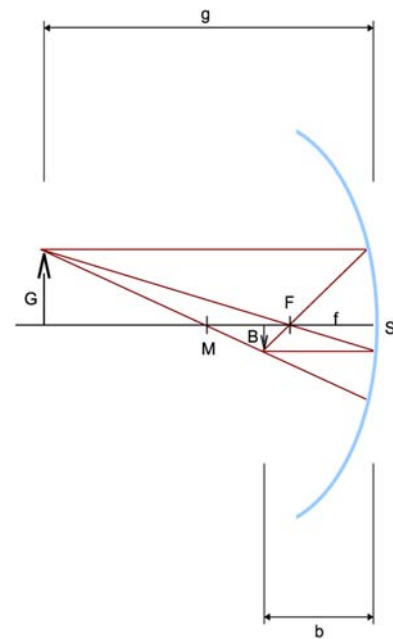
Parabolspiegel

In einen Parabol- oder Hohlspiegel verhält sich jeder Punkt der inneren Oberfläche so wie eine ganz kurze Gerade an der das Licht reflektiert wird.

- Strahlen parallel zur optischen Achse werden zum Brennpunkt reflektiert.
- Strahlen durch den Brennpunkt werden parallel zur optischen Achse reflektiert.
- Strahlen durch den Mittelpunkt werden in sich selbst reflektiert.

Die Lichtstrahlen folgen dabei dem Superpositionsgesetz; Dieses besagt, dass sich Lichtstrahlen gegenseitig durchdringen können, ohne sich zu stören oder zu beeinflussen.

Praktische Anwendung findet dieses Prinzip zum Beispiel bei Spiegel-Ojektiven.



- | | |
|--------------------------|---------------------|
| M...Mittelpunkt | S.....Scheitelpunkt |
| F.....Brennpunkt (Fokus) | f.....Brennweite |
| G...Gegenstand | B....Bild |
| g....Gegenstandsweite | b.....Bildweite |



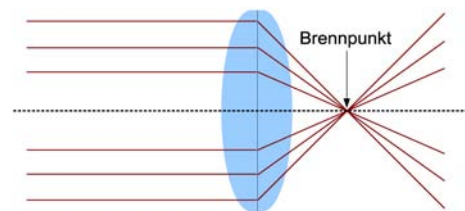
1.1.3 optische Linsen

Als Linse bezeichnet man ein optisch wirksames Bauelement mit zwei lichtbrechenden Flächen, von denen mindestens eine Fläche konvex oder konkav gewölbt ist.



3

Eine gedachte Linie, auf welcher die Krümmungsmittelpunkte der Linsenflächen liegen, wird als Optische Achse bezeichnet. Jede Linse hat einen **Brennpunkt (Focus)** in dem alle Lichtstrahlen gesammelt werden.

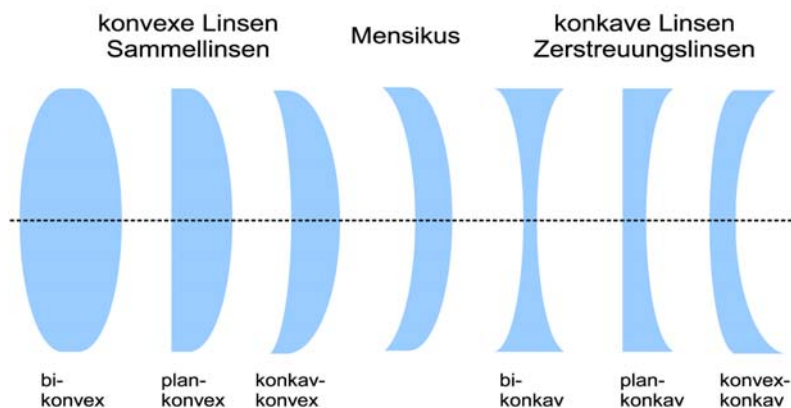


1.1.3.1 Linsenformen

Bei den einfachsten Linsen sind die beiden optisch aktiven Flächen sphärisch. Das heißt, sie sind Oberflächenausschnitte einer Kugel. Daher kann man diesen Flächen Krümmungsradien zuordnen. Je größer dieser Radius wird, desto kleiner muss daher auch die Linse werden; daraus ergibt sich eine bestimmte Grenze beim Krümmungsradius.

Jede Linsenfläche kann konvex, konkav oder plan (eben) sein:

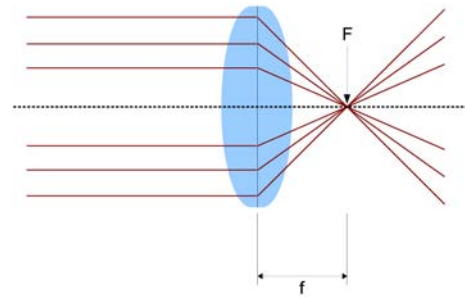
- konvex: die Fläche ist nach Außen gewölbt
- konkav: die Fläche ist nach Innen gewölbt
- plan: eine ebene Fläche wird durch einen unendlichen Krümmungsradius beschrieben





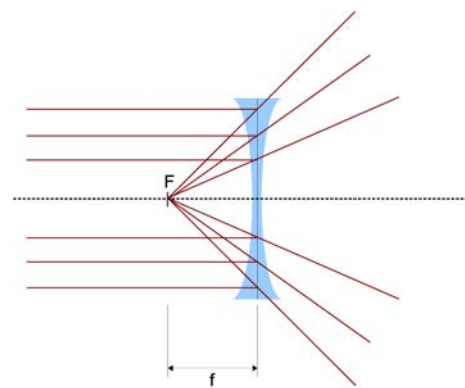
Sammellinsen

Bikonvexe und plan-konvexe Linsen wirken als Sammellinsen; parallel einfallende Lichtstrahlen werden idealerweise in einem Punkt, dem Fokus oder Brennpunkt (F), gesammelt. Der Abstand zwischen Linsenmitte und dem Brennpunkt ist die Brennweite (f).



Zerstreuungslinsen

Plan-konkave und bikonkave Linsen wirken als Zerstreuungslinsen; einfallende Parallelstrahlen laufen scheinbar vom Brennpunkt auf der Einfallseite des Lichtes auseinander.



1.1.3.2 Bildkonstruktion

Für die Konstruktion eines Bildes benötigt man zwei Strahlen.

- den Zentralstrahl:
Er geht vom Objekt aus und schneidet die optische Achse ohne Richtungsänderung in der Mitte der Linse
- den Parallelstrahl:
Er fällt parallel zur optischen Achse ein.
Bei Sammellinsen wird er stets zum Brennpunkt hin gebrochen und bei Zerstreuungslinsen scheint es als käme er vom rückwärtigen Brennpunkt.

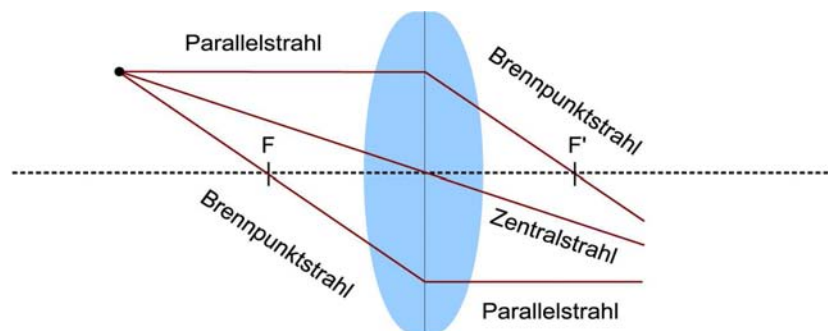




Abbildung durch Sammellinsen

Beim Durchtritt durch eine konvexe Linse schneiden sich Zentralstrahl und Parallelstrahl in einem Punkt hinter der Linse. Dieser Schnittpunkt definiert den Ort des Bildes. Eine Sammellinse bildet also einen Gegenstand ab, indem sie ein reelles Bild erzeugt, das mit einer Kamera aufgefangen oder auf einem Schirm sichtbar gemacht werden kann.

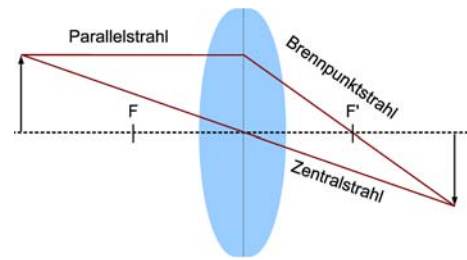
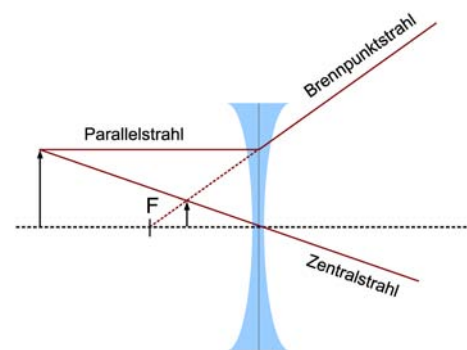


Abbildung durch Zerstreuungslinsen

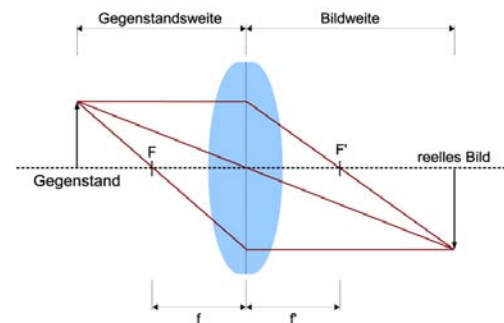
Da die Lichtstrahlen durch eine konkave Linse zerstreut werden, kann sie kein reelles Bild produzieren. Betrachtet man ein Objekt durch eine Zerstreuungslinse, so scheinen alle Lichtstrahlen von einem verkleinerten virtuellen Bild vor der Linse zu kommen. In diesem Punkt schneiden sich der Zentralstrahl und der nach hinten verlängerte Parallelstrahl.



Gegenstandsweite und Bildweite

Die Gegenstandsweite beschreibt den Abstand zwischen dem abzubildenden Objekt und der optischen Linse bzw. dem optischen Systems.

Die Bildweite dagegen stellt die Entfernung des erzeugten Bildes zum optischen System dar.

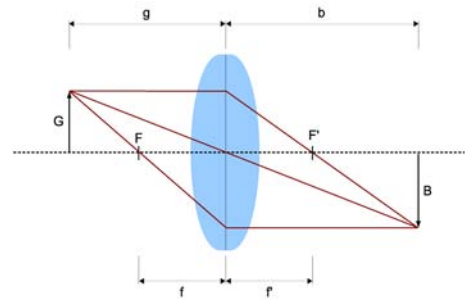




1.1.3.3 Linsengleichung und Abbildungsmaßstab

Mit der Linsengleichung, auch Abbildungsgleichung genannt, kann man die optische Abbildung einer idealen Linse berechnen.

Für die Strahlenkonstruktion betrachten wir wichtigen Lichtstrahlen: Parallelstrahl, Brennpunktstrahl und Zentralstrahl bei einer dünnen (ideale) Linse.



Setzen wir nun die Bildgröße B (Bild im Mikroskop oder auf dem Film) mit der Größe des Objekts G (betrachteter oder fotografierter Gegenstand) in Beziehung so erhalten wir den Abbildungsmaßstab (A).

$$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

In Folge entspricht das Verhältnis von Abbildungsgröße zu Objektgröße dem Verhältnis von Bildweite (b) zu Gegenstandsweite (g).

Wendet man den Strahlensatz der Geometrie auf den Brennpunktstrahl und die sich mit ihm im Brennpunkt kreuzende optische Achse an, so erhält man:

$$\frac{B}{G} = \frac{b-f}{f} \quad \text{oder} \quad \frac{b}{g} = \frac{b-f}{f}$$

Mit einer Division durch b und Umordnen der Gleichung erhält man folgende Beziehung die als **Linsen- oder Abbildungsgleichung** bezeichnet wird.

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



1.1.3.4 Linsenfehler

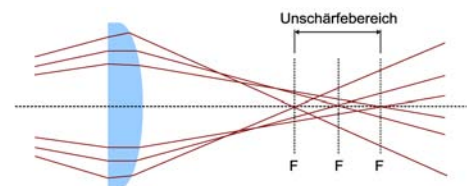
Durch Abweichungen von den in den vorhergehenden Kapiteln dargestellten idealen optischen Abbildungen entsteht ein unscharfes oder verzerrtes Bild. Diese optischen Abbildungsfehler (Aberrationen) treten vor allem bei Einzellinsen mit sphärischen Oberflächen (Schnitt aus einer Kugel) auf und können durch spezielle Linsen-Konstruktionen behoben werden.

Im folgenden werden besprochen:

- sphärische Aberration
- chromatische Aberration
- Bildfeldwölbung
- Verzeichnung
- Koma

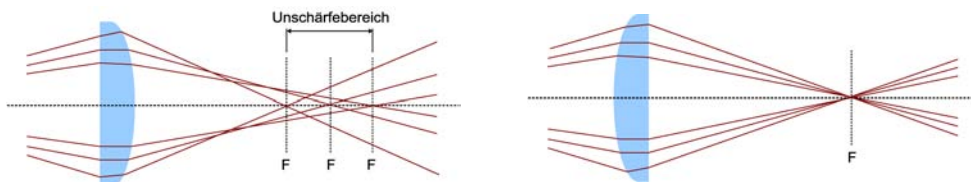
sphärische Abberation

Sphärische Aberration (Öffnungsfehler) ist ein Abbildungsfehler der bei einfachen Linsen auftritt, die mit sphärischer Krümmung geschliffen sind. Lichtstrahlen, die durch die Randzonen der Linse gehen, werden stärker gebrochen und in einem der Linse näher liegendem Brennpunkt fokussiert als mittig einfallende Lichtstrahlen; die Folge ist ein leicht verschwommenes, unscharf wirkendes Bild.



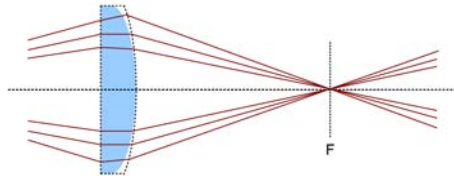
Korrektur:

- Da Lichtstrahlen, die den Rand der Linse passieren, am meisten zur Unschärfe beitragen, kann der Fehler am einfachsten durch **Ablenden der Randstrahlen** verringert werden.
- Bei **asymmetrisch sphärischen Linsen** (Linsen mit zwei unterschiedlichen Krümmungsradien) kann durch die Orientierung der Linse die Sphärische Aberration gehoben werden. Bei „Linsen bester Form“ wird dabei die effektive Brechkraft gleichmäßig auf beide Grenzflächen verteilt, was zu einer nahezu fehlerfreien Abbildung führt.



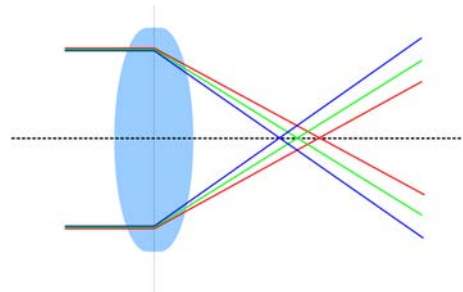


- Bei der Verwendung von **asphärischen Linsen** tritt dieser Fehler nicht auf, da bei ihnen der Radius der Oberflächen nicht konstant ist, sondern von der Mitte zum Rand hin abnimmt. Diese Variante zeigt die beste Korrektur der Sphärischen Aberration, sie ist jedoch auch mit Abstand die teuerste.



chromatische Aberration

Die Chromatische Aberration (Farblängsfehler) tritt auf, weil am Rand der Linse Licht unterschiedlicher Wellenlänge verschieden stark gebrochen und wie bei einem Prisma in seine spektralen Bestandteile aufgespalten wird; dieser Effekt führt zu Farbsäumen am Bildrand.

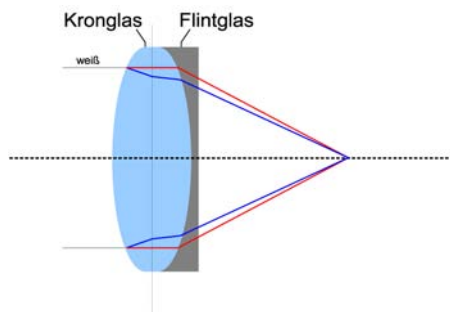


Korrektur:

- Da wiederum der Rand der Linse den Großteil der Aberration verursacht, kann der Fehler wie bei der sphärischen Aberration am leichtesten durch die Verwendung einer Blende gehoben werden.
- Für hochwertigere Optiken wird die Korrektur durch die Kombination von zwei Linsen erreicht, welche zusammen einen so genannten Achromaten bilden. Die Linsen werden dabei so gewählt, dass die Linsengruppe für mehrere Wellenlängen annähernd die gleiche Brennweite besitzt.

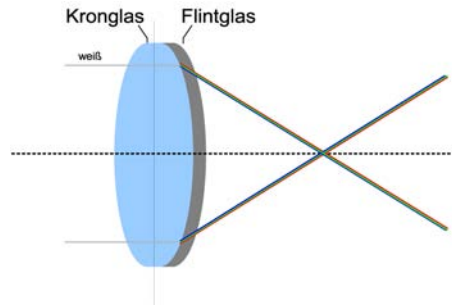
Je nach verwendeten Glassorten können 2 oder 3 Farben zusammengeführt werden.

Achromat: die Linsen und Glassorten sind so gewählt, dass der rote und der blaugrüne Spektralteil zusammenfallen





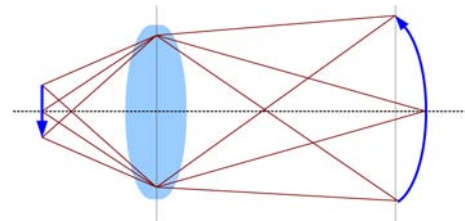
Apochromat: stellt eine aufwändigere Konstruktion dar, bei der drei Wellenlängen (rot, grün und blau) zusammenfallen, dieser Mehraufwand lohnt sich insbesondere bei langen Brennweiten.



- Bei Spiegelobjektiven tritt keine chromatische Aberration auf!!!

Bildfeldwölbung

Bei der Bildfeldwölbung wird das Bild nicht eben auf einer Fläche, sondern gewölbte abgebildet. Man kann das Bild somit nicht an allen Punkten gleichzeitig scharf stellen; wenn man auf die Bildmitte scharf stellt, ist der Rand unscharf und umgekehrt. Dieser Fehler entsteht weil Punkte am Rand der Linse näher zur optischen Achse abgebildet werden als Mittige.

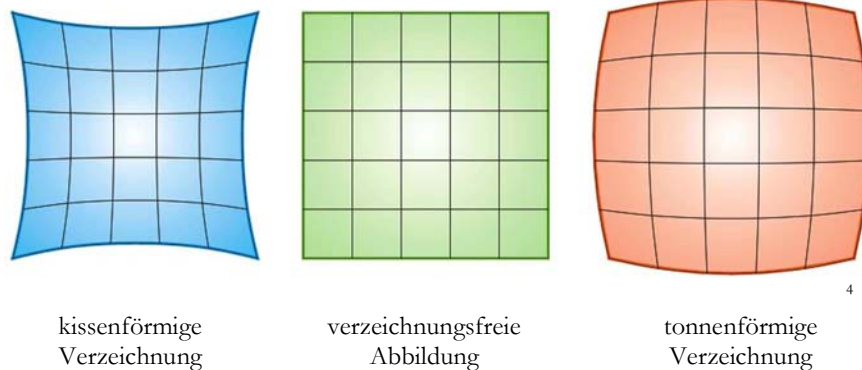


Korrektur:

- Durch die Verwendung einer Blende können die Randbereiche ausgeblendet werden; die Schärfentiefe wird dabei höher und die Bildfeldwölbung verliert an Bedeutung.
- Bei hochwertigen Optiken wird die Korrektur durch die Kombination mehrerer Linsen erreicht.

Verzeichnung

Unter Verzeichnung versteht man die nicht maßstabgetreue Abbildung eines Objektes. Dieser Fehler entsteht durch einen veränderten Abbildungsmaßstab bei weit von der optischen Achse entfernten Bildpunkten. Daraus resultiert, dass Linien die nicht durch den Bildmittelpunkt verlaufen gekrümmt dargestellt werden. Je nachdem ob der Abbildungsmaßstab zum Bildrand hin zu- oder abnimmt erhält man eine kissen- oder tonnenförmige Verzeichnung. Besonders stark tritt dieser Fehler in der Fotografie bei extremen Tele- oder Weitwinkelobjektiven (Fish-eye) auf.



kissenförmige Verzeichnung

verzeichnungsfreie Abbildung

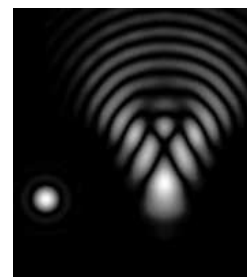
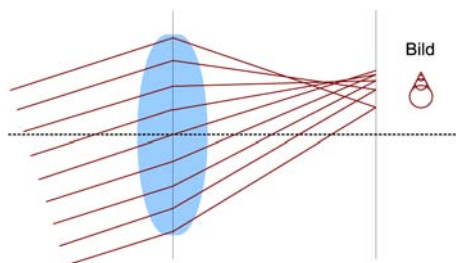
tonnenförmige Verzeichnung

Korrektur:

- Eine Korrektur ist nur mit speziellen Objektiven aus mehreren Linsen möglich, ein Abblenden der Randstrahlen zeigt in diesem Fall keinen Effekt.

Koma

Lichtstrahlen eines Objektes abseits der optischen Achse treffen als paralleles Strahlenbündel schräg auf die Linse und werden auch schräg wieder gebündelt. Bei unkorrigierten Optiken kann es zu einer verzerrten Abbildung kommen. Das Objekt wird mit einem zum Rand hin verlaufenden Schweif abgebildet.



5

Durch Abblenden der Randstrahlen ist eine leichte Hebung des Fehler möglich, eine vollständige Korrektur kann nur durch speziell konstruierte Optiken erfolgen; diese aufwendigen Linsensysteme werden als aplanat bezeichnet.

4 <http://de.wikipedia.org/wiki/Abbildungsfehler#Verzeichnung>

5 http://de.wikipedia.org/wiki/Abbildungsfehler#Koma_28Asymmetriefehler.29



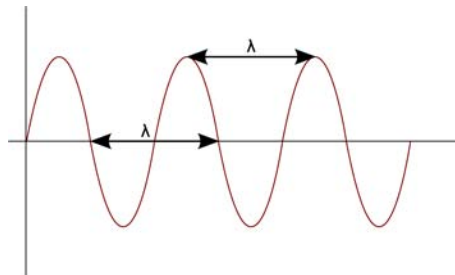
1.1.4 Wellenoptik

1.1.4.1 Welleneigenschaft

Unter Wellenoptik versteht man den Bereich der Optik, der sich mit der Welleneigenschaft des Lichts beschäftigt.

Licht besteht demnach aus elektrischen und magnetischen Feldern, die sich wellenförmig ausbreiten, also einer elektromagnetischen Welle. Dargestellt wird sie normalerweise als Sinuswelle welche durch Wellenlänge, Frequenz, Amplitude und Phase charakterisiert wird.

- Wellenlänge: Als Wellenlänge λ (Lambda) versteht man den Abstand zweier Punkte mit gleicher Phase. Punkte die im zeitlichen Ablauf die gleiche Auslenkung (Amplitude) und die gleiche Bewegungsrichtung haben. Die Angabe der Wellenlänge erfolgt normalerweise in nm.



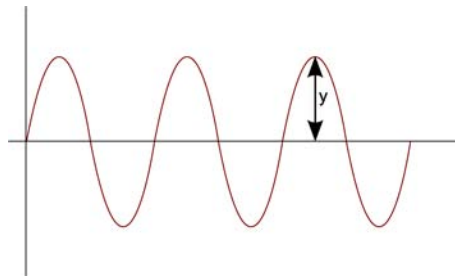
- Frequenz: Die Frequenz f gibt die Anzahl der vollen Schwingungen (Perioden - T) pro Zeiteinheit (s) an und wird nach dem deutschen Physiker Heinrich Hertz in Hertz ($\text{Hz} = 1/\text{s}$) gemessen.

Zwischen der Frequenz und der Wellenlänge besteht ein direkter physikalischer Zusammenhang:

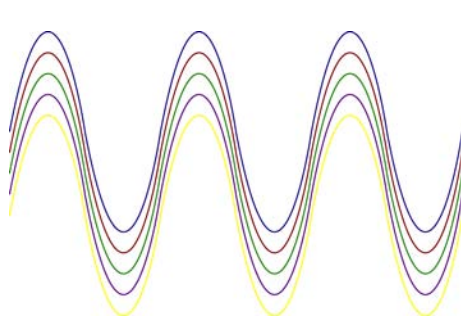
$$\text{Wellenlänge } \lambda \cdot \text{Frequenz } f = \text{Lichtgeschwindigkeit } c$$



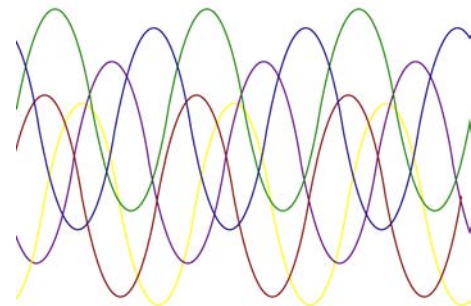
- Amplitude: Die Amplitude y beschreibt die maximale Auslenkung einer Schwingung, also dort wo der Wellenberg am höchsten ist. Bei Lichtwellen ist die Amplitude nicht immer direkt messbar; von ihr abhängig ist jedoch die Intensität (Helligkeit); diese kann in Folge auch gemessen werden kann



- Phase: Die Phase φ gibt an, wann und wo die Wellenberge, bzw. die Wellentäler sind – also den Schwingungszustand einer Welle



Gleichphasige Sinuswellen



Sinuswellen unterschiedlicher Phasen

Mit dem Wellenmodell des Lichts lassen sich viele Eigenschaften erklären und auch berechnen, die sich durch die geometrische Optik nicht beschreiben lassen.

Dazu gehören Farbe, Interferenz, Beugung und Polarisation.



1.1.4.2 Farben & Wellenlängen

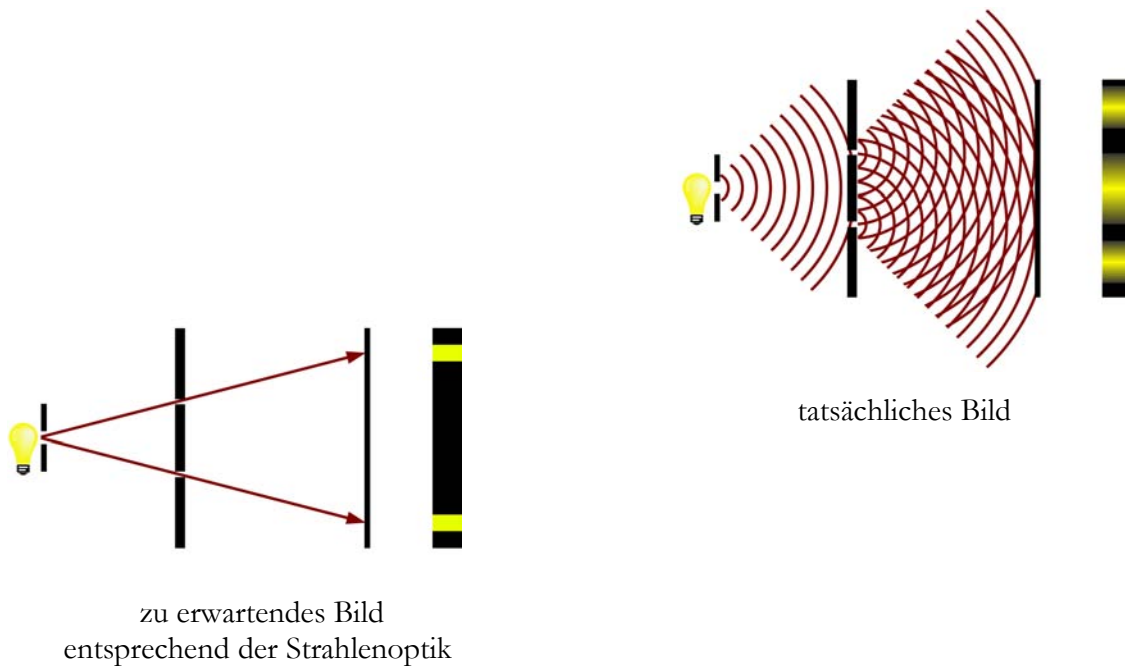
Die Farbe des Lichts ist abhängig von der Wellenlänge. Monochromatisches Licht besteht nur aus einer Wellenlänge, weißes Licht hingegen entsteht durch die Überlagerung vieler Wellen mit unterschiedlicher Wellenlängen.

- **Sichtbares Licht** befindet sich in einem Wellenlängen- und Frequenzbereich der vom Auge in Sehempfindungen umgesetzt werden kann (**400 – 760 nm**).
- **UV-Licht** ist kurzwelliger (**250 – 400 nm**) und sehr energiereich
- **Infrarot-Licht** hingegen ist langwellig (**über 760 nm**) und damit auch energieärmer.



1.1.4.3 Beugung

Aufgrund der Welleneigenschaft des Lichtes weicht das reale Verhalten stark von jenem ab, welches man von der zuvor besprochenen Strahlenoptik erwarten würde. Belegt wurde dies 1802 von Thomas Young mit seinem Doppelspaltversuch:



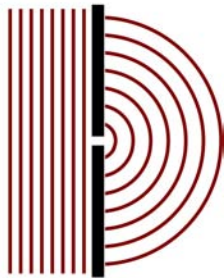
Das physikalische Modell für die Beugung ist das Huygenssche Prinzip (nach Christiaan Huygens), es



besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer neuen Welle, der sogenannten Elementarwelle, betrachtet werden kann.

Überlagerung von Wellen

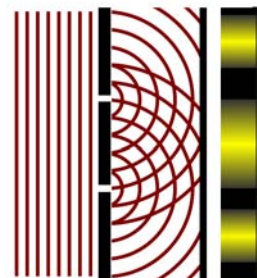
Die Überlagerung sämtlicher Elementarwellen (in drei Dimensionen sind Elementarwellen kugelförmig, in zwei Dimensionen kreisförmig) ergibt die beobachtete Wellenfront.



Die Welle geht durch ein Hindernis und erzeugt dort eine **neue Elementarwelle**.



Zusammensetzung von 2 Elementarwellen zu einer **neuen Wellenfront**.



Die Überlagerung von Elementarwellen kann zu gegenseitiger Verstärkung (konstruktive Interferenz) oder gegenseitiger Abschwächung (destruktive Interferenz) oder gar Auslöschung führen.

1.1.4.4 Interferenz

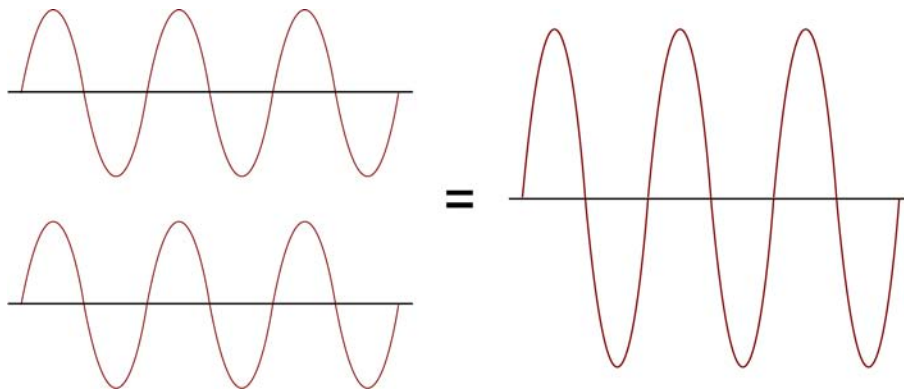
Um eine stabile Überlagerung von Wellen zu erhalten, müssen die Wellen kohärent sein (dh. sie müssen die gleiche Frequenz besitzen) und es muss eine zeitlich konstante Phasenbeziehung zwischen den überlagerten Wellen bestehen.

Bei den entstehenden Überlagerungen addieren sich die kohärenten Wellen und es bilden sich neue Wellen. Dabei ist zu beachten, dass sich die Wellen je Verschiebung der Schwingung (Gangunterschied) verstärken (konstruktive Interferenz) oder auslöschen (destruktive Interferenz).



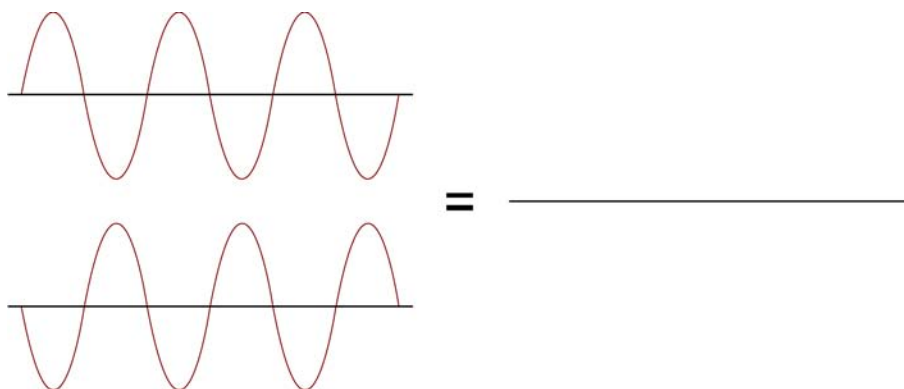
Konstruktive Interferenz

tritt dann auf, wenn der Gangunterschied der beiden Wellen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist, somit trifft immer ein Wellenberg auf einen Wellenberg und ein Wellental auf ein Wellental. Haben beide Wellen dieselbe Amplitude so führt konstruktive Interferenz zu einer doppelt so großen Amplitude. (Gangunterschiede/Phasendifferenz: $\Delta\varphi = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi\dots$)



Destruktive Interferenz

hier beträgt der Gangunterschied immer nur ein Vielfaches der halben Wellenlänge; die beiden Wellen schwingen also gegenphasig. Es treffen somit immer Wellenberg auf Wellental und umgekehrt. Die resultierende Welle ist daher kleiner als bei den beiden ursprünglichen Wellen - daher der Name destruktive Interferenz. Haben beide Wellen dieselbe Amplitude, so löschen sie sich sogar gänzlich aus. (Gangunterschiede/Phasendifferenz: $\Delta\varphi = \pi, 3\pi, 5\pi, 7\pi\dots$)

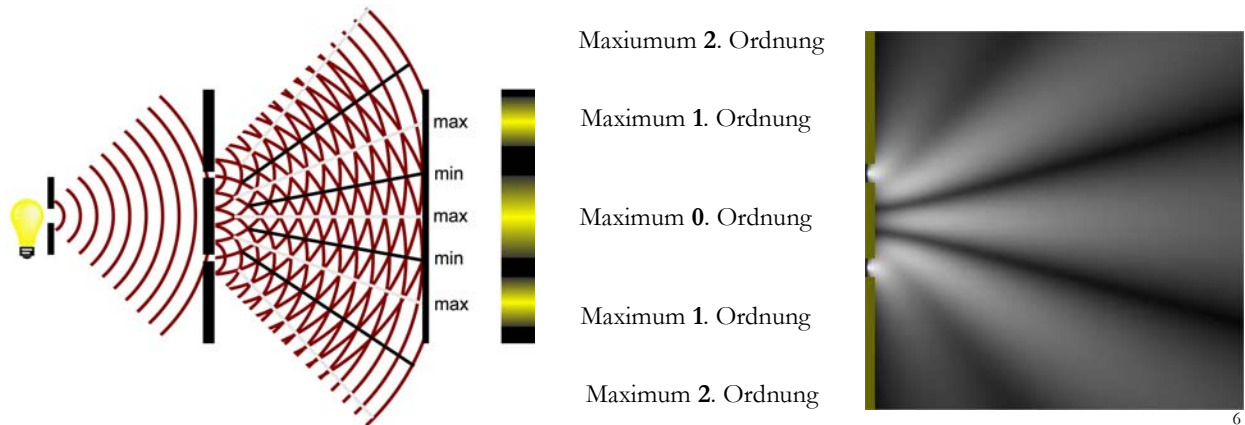




Doppelspaltversuch

Beim Doppelspaltversuch von Thomas Young (1802) lässt man kohärentes - monochromatisches Licht auf eine Blende mit zwei schmalen Schlitten fallen, an denen das Licht gebeugt wird.

Die dabei neu entstandenen Wellen sind kohärent und breiten sich so aus, dass sie an vielen Punkten zusammentreffen und interferieren.



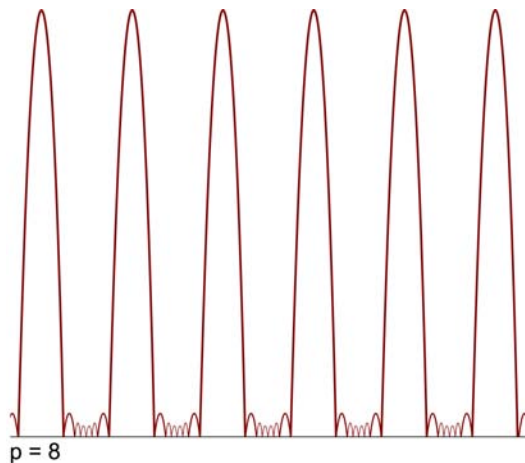
Besteht zwischen den Wellen ein Phasenunterschied von einem ganzen Vielfachen der Wellenlänge, so addieren sich die Amplituden, und es entsteht an dieser Stelle eine Verstärkung – **Maxima**.

Im entgegengesetzten Fall beträgt der Gangunterschied nur ein halbes Vielfaches der Wellenlänge und es kommt zur Auslöschung - **Minima**

Beugung am Gitter

Wie beim Doppelspaltversuch lassen wir kohärentes – monochromatisches Licht auf eine Blende fallen. Dieses Mal allerdings auf eine Blende mit einer große Anzahl von Einzelspalten (p), jeweils mit dem Abstand g zueinander (g = Gitterkonstante).

Die Teilwellen von den Spalten geben durch Interferenz in der Beobachtungsebene scharfe, gut getrennte Hauptmaxima (0.,1.,2.... Ordnung). Dazwischen liegen kaum sichtbare Nebenmaxima.



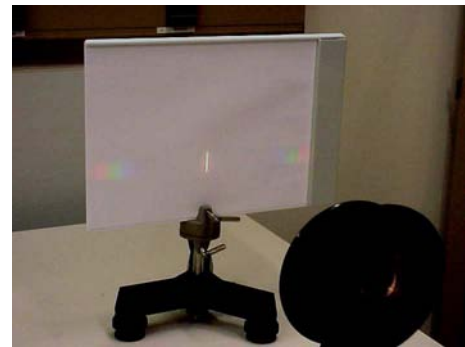
Bspl: Bei $p = 4$ ist jedes 3. Maximum ein Hauptmaximum, bei $p = 8$ jedes 7. Maximum usw.



Versuch mit weißem Licht:

Man erhält in der Mitte des Schirms ein scharfes Spaltbild
= Hauptmaximum 0. Ordnung.

Rechts und links davon sind die beiden Maxima
1. Ordnung als kontinuierliche Spektren abgebildet.



1.1.4.5 Polarisation

Licht stellt eine elektromagnetische Welle dar, die transversal zur Ausbreitungsrichtung schwingt. Senkrecht zur Ausbreitungsrichtung sind Schwingungen nach allen Raumrichtungen möglich.

Unpolarisiertes Licht

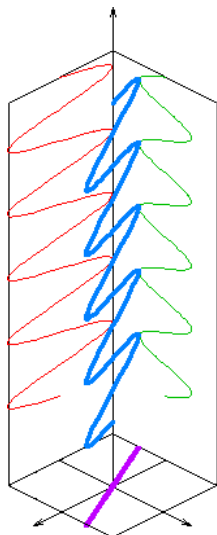
besteht aus einer Überlagerung von Wellen die nach allen Richtungen schwingen.

Polarisiertes Licht

besteht hingegen nur aus Wellen die alle in der gleichen Ebene schwingen.

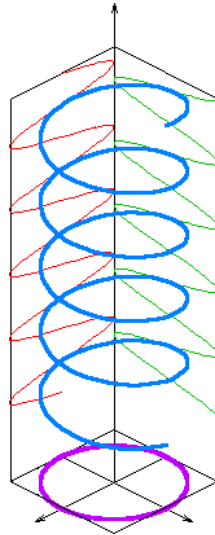
Dabei lassen sich 3 Formen von polarisiertem Licht unterscheiden:

Linear polarisiertes Licht



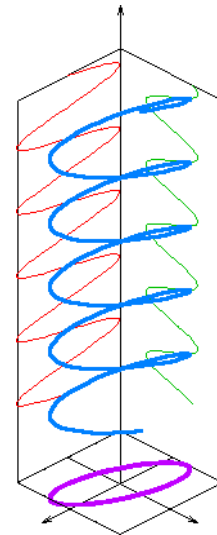
Schwingungen erfolgen nur in **einer bestimmten Richtung** senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Zirkular polarisiertes Licht



Die Schwingungsebene des elektrischen Feldes dreht sich bei **konstanter Feldstärke**.

Elliptisch polarisiertes Licht



Ähnlich wie zirkular polarisiertes Licht, nur ändert sich hier die **Feldstärke** der elektro-magnetischen Welle **elliptisch**.

7 <http://kaluza.physik.uni-konstanz.de/DP/dparchiv/dp2003/wienbr/Spektrum.html>

8 <http://de.wikipedia.org/wiki/Polarisation>



Polarisationsfilter

Die Polarisation von Licht wird durch Polarisationsfilter erreicht, diese lassen nur Licht passieren, welches in der Polarisationsebene des Filters liegt. Dem zufolge ist das Licht, welches den Polarisationsfilter verlässt, immer polarisiert.



Bei **linearen Polarisationsfiltern** schwingt das ausfallende Licht in genau einer Richtung und wird daher linear polarisiertes Licht genannt.

Bei zirkularen **Polarisationsfiltern** wird das Licht zunächst linear polarisiert und anschließend durch ein $\lambda/4$ -Plättchen geschickt. Dadurch wird pro Phase eine Drehung um die Ausbreitungsachse erreicht, wobei aber die Polarisationsrichtung erhalten bleibt.

Ein **$\lambda/4$ -Plättchen** ist meist ein doppelbrechender Kristall der das einfallende Licht um eine viertel Wellenlänge ($\pi/2$) gegen die dazu senkrechte Richtung verzögert. Mit einem $\lambda/2$ -Plättchen kann das Licht um eine halbe Wellenlänge (π) verzögert und damit die Polarisationsrichtung von linear polarisiertem Licht gedreht werden.

natürliche Polarisation

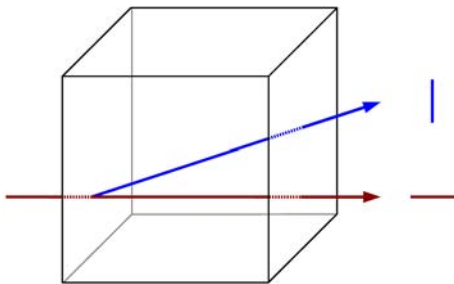
Polarisiertes Licht kann nicht nur künstlich mit Hilfe von Filtern erzeugt werden, sondern es wird auch von den folgenden Phänomenen erzeugt.

- Reflexion: Betrachtet man das von einer glatten Fläche (zB Glas- oder Wasserfläche) reflektierte Licht durch ein Polarisationsfilter so sieht man dass es hauptsächlich in einer Ebene schwingt.
- Absorption
- Streuung
- Doppelbrechung (Kristalle)



1.1.4.6 Doppelbrechung

Als doppelbrechend werden Strukturen bezeichnet die in der Lage sind einfallende Lichtstrahlen in zwei Teilstrahlen oder Wellenzüge aufzuspalten, von denen jeder linear polarisiert ist und deren Schwingungsebenen senkrecht aufeinander stehen. Wobei jedes Material definierte Schwingungsrichtungen für die Teilstrahlen besitzt.



Fällt nun Licht gerade auf ein doppelbrechendes Medium so verläuft der ordentliche Strahl (ordinärer Strahl "o") ungebrochen durch das Medium, der außerordentlichen Strahl (extraordinärer Strahl "e") hingegen wird abgelenkt.

- **ordentliche Strahl:** folgt konstant dem Brechungsgesetz und wird entsprechend dem jeweiligen Brechungsindex gebrochen
-- er verläuft bei geradem Lichteinfall ungebrochen
- **außerordentlicher Strahl:** der Brechungsindex für diesen Strahl ist nicht konstant sondern abhängig vom Einfallswinkel des Lichtes.
-- wird bei geradem Lichteinfall abgelenkt.

Aufgrund dieser abweichenden Brechungsindices verlaufen die beiden Strahlen verschieden schnell durch das Medium; wodurch sie beim Austritt in ihrer **Phase verschoben** sind. die Schwingungsebene des außerordentlichen Strahls senkrecht zum ordentlichen Strahl ausgerichtet.

Doppelbrechende Strukturen zeigen also ein vom Einfallswinkel abhängiges Brechungsverhalten und werden daher als **anisotrop** bezeichnet.

Im Gegensatz dazu stehen isotrope Materialien die keine Abhängigkeit vom Einfallswinkel zeigen (zB: Steinsalz oder spannungsfreies Glas).

Stärke der Doppelbrechung

Die Stärke der Doppelbrechung ergibt sich aus der Differenz der beiden Brechungsindices ($n_o - n_e$) und ist bei Materialien mit Eigendoppelbrechung eine Materialkonstante.

⁹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Doppelbrechung>



Je nach dem ob die Differenz negativ oder positiv ist spricht man auch von **optisch negativ** oder **optisch positiv**.

Beispiel:

Kalzit mit einem Brechungsindex von 1,4864. Bei geradem Lichteinfall ergibt sich für den außerordentlichen Strahl der Brechungsindex $n_e = 1,6583$
 $1,4864 - 1,6583 = -0,1719$ (optisch negativ)

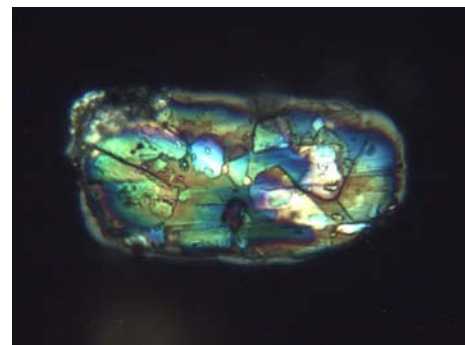
Doppelbrechung kann in Kombination mit polarisiertem Licht und einer spezielle optische Anordnungen im Mikroskop genutzt werden um eine Interferenz der beiden Strahlen zu erreichen. Dadurch kann ein kontrastreicheres Bild erzeugt oder durch das Auftreten von unterschiedlichen Farbsäumen Mineralen bestimmt werden.

Doppelbrechende Materialien werden auch in optischen Bauelementen wie etwa Phasenverschiebern (λ/n -Plättchen) oder Polarisatoren genutzt wird.

Bei der Art der doppelbrechenden Strukturen lassen sich 3 Typen unterscheiden:

Eigendoppelbrechung

Eigendoppelbrechung kommt bei Objekte vor die aus Kristallgittern aufgebaut sind. Dazu zählen alle Kristalle mit Ausnahme von Steinsalz.



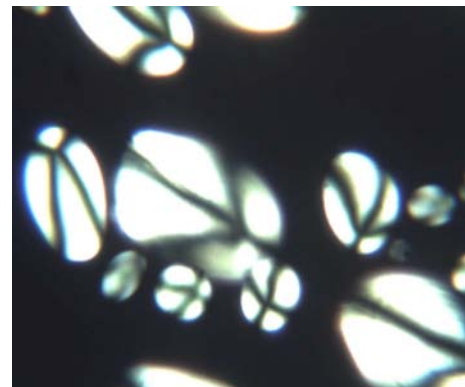
Glucose im Polarisationsmikroskop

Formdoppelbrechung

Nicht doppelbrechende Teilchen die in einer Dimension kleiner sind als die Lichtwellen können ebenfalls doppelbrechend werden. Dazu müssen die Teilchen gleichmäßig angeordnet sein und sich zwischen ihnen ein Medium mit abweichender Brechkraft befinden.

Zu diesem Typ zählen viele biologische Objekte wie zum Beispiel Zellulose oder Stärke.

Die Formdoppelbrechung kann sich auch mit der Eigendoppelbrechung überlagern wenn die einzelnen Teilchen selbst Eigendoppelbrechung besitzen.

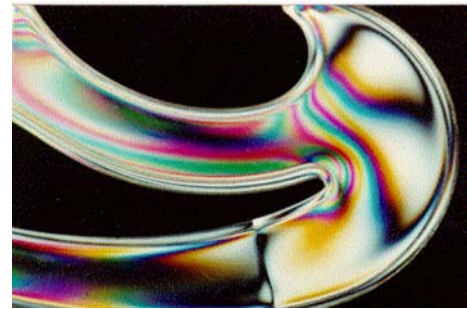


Stärke im Polarisationsmikroskop



Spannungsdoppelbrechung

Doppelbrechung kann auch bei nicht doppelbrechenden isotropen Materialien auftreten wenn diese bestimmten Kräften ausgesetzt werden (zB Verformung).

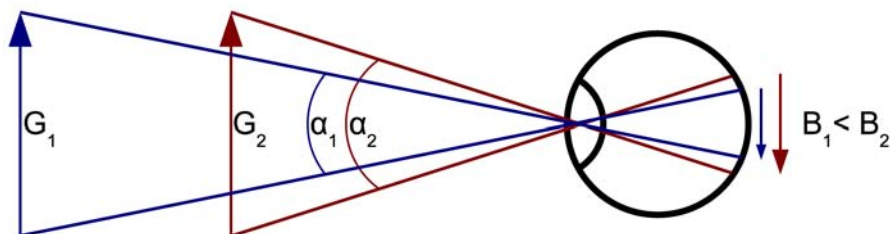


Kurvenlineal zwischen Polfiltern ¹⁰

1.1.5 Optische Instrumente

Das einfachste optische Instrument ist unser Auge, es besteht vereinfacht aus einer Linse und der Netzhaut, auf der der zu beobachtende Gegenstand abgebildet wird.

Die beobachtete Größe (**scheinbare Größe**) eines Objekts hängt vom Winkel (Sehwinkel α), unter dem es von einem Beobachter wahrgenommen wird ab. Objekte gleicher Größe (G_1 und G_2) erscheinen in unterschiedlicher Entfernung unterschiedlich groß, weil sie unter verschiedenen Sehwinkeln und damit auch unterschiedlich groß auf der Netzhaut abgebildet werden.



Durch die Veränderung des Augenlinsen-Durchmessers kann die Brennweite und damit der Sehwinkel des Auges vergrößert oder verkleinert werden. Bis zu einem bestimmten Grad ist so eine Anpassung an die jeweilige Objektentfernung möglich. (Akkommodation) Ohne Anstrengung des Auges ist eine längere Beobachtung von Objekten nur in einer Entfernung von etwa 25 cm möglich. (konventionelle Sehweite)

Um den Sehwinkel bzw. die Sehweite des Auges künstlich zu vergrößern verwendet man Hilfsmittel wie Lupe, Mikroskop oder Fernrohr.

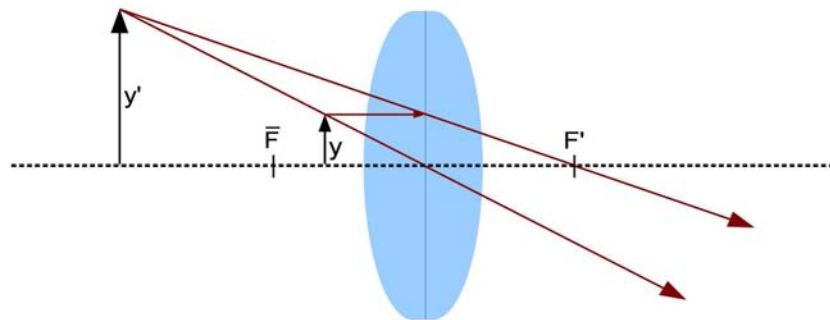
¹⁰ <http://pluslucis.univie.ac.at/FBA/FBA95/Schloegl/schloegl.html>



1.1.5.1 Lupen

Eine Lupe, auch Brennglas genannt, ist eine einfache konvexe Linse mit kleiner Brennweite. Dabei befindet sich der abzubildende Gegenstand innerhalb der Brennweite f , die Gegenstandsweite ist also kleiner als die Brennweite. Somit ist die Bildweite kleiner null und es entsteht ein vergrößertes, aufrechtes jedoch nur virtuelles Bild.

Die Funktion einer Lupe besteht also darin den Schwinkel für das Auge zu vergrößern.



1.1.5.2 Objektive

Objektive sind optische System, die ein reelles Bild eines Objektes erzeugen. Sie sind zumeist aus mehreren Einzellinsen oder Spiegeln zusammengesetzt und werden für Kameras, Mikroskope oder Ferngläser verwendet.

Die Größe des erzeugten Bildes hängt von der Brennweite der Linse und von der Lage des Objektes ab.

Mikroskop-Objektiv

Bei einem Mikroskop-Objektiv liegt der betrachtete Gegenstand im Bereich zwischen der einfachen Brennweite (f) und der doppelten Brennweite ($2f$). Es entsteht ein vergrößertes und reelles aber seitenverkehrtes (auf dem Kopf stehendes) Bild.

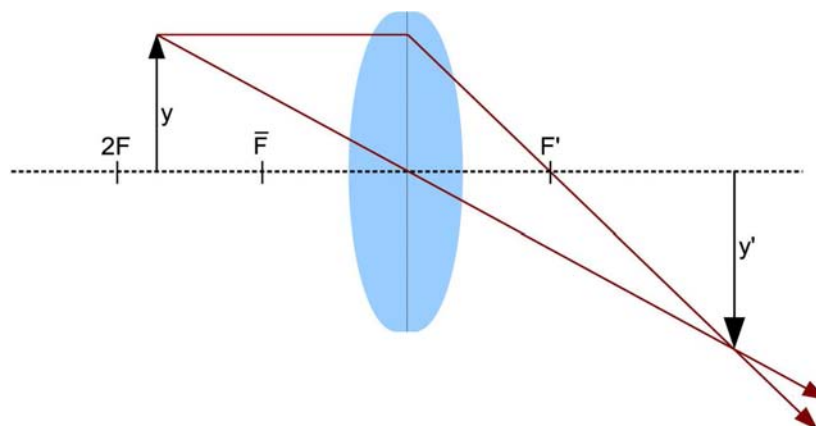
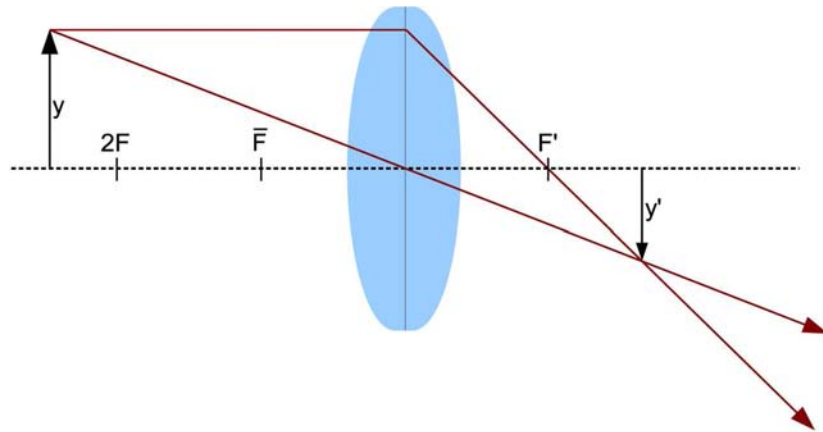




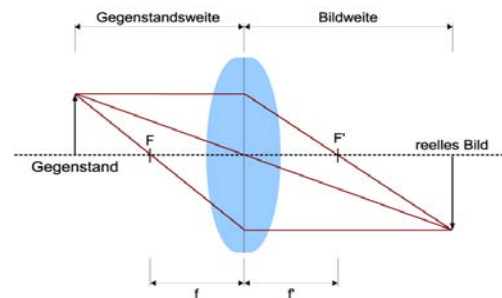
Foto-Objektiv

Im Falle des Foto-Objektives liegt der abzubildende Gegenstand außerhalb der doppelten Brennweite ($2F$), es entsteht wieder ein reeles und verkehrtes Bild, wobei der Gegenstand jetzt aber verkleinert abgebildet wird.



1.1.5.3 Gegenstandsweite und Bildgröße

Die Linsengleichung beschreibt das Verhältnis zwischen Bildgröße und Gegenstandsgröße, das heißt den Abbildungsmaßstab.



Abbildungsmaßstab

Der Abbildungsmaßstab kann 3 Größen einnehmen:

- Der Abbildungsmaßstab ist **größer als 1**:
der Gegenstand befindet sich innerhalb der einfachen Brennweite
hier ist die Bildgröße größer als die Gegenstandsgröße,
der Gegenstand wird vergrößert aber virtuell abgebildet – *Lupe*.

der Gegenstand befindet sich zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite
damit ist die Bildgröße größer als die Gegenstandsgröße,
der Gegenstand wird vergrößert und reell abgebildet – *Mikroskop Objektive*.



- Der Abbildungsmaßstab ist **kleiner als 1**:
der Gegenstand befindet sich außerhalb der doppelten Brennweite
die Bildgröße ist in diesem Fall kleiner als die Gegenstandsgröße,
der Gegenstand wird verkleinert aber reell abgebildet – *Foto Objektive*.
- Der Abbildungsmaßstab ist **gleich 1**:
der Gegenstand befindet sich genau auf der doppelten Brennweite ($2f$)
hier sind Bild- und Gegenstandsgröße gleich groß und
der Gegenstand wird reell und in seiner wirklichen Größe auf dem Film abgebildet.
- Sonderfall:
der Gegenstand befindet sich genau auf der einfachen Brennweite (f)
in dieser Position ist die Bildweite unendlich groß und damit auch das entstehende reelle Bild.

Zusammenfassung

	Gegenstandsweite g	Bildweite b	Bildgröße B	Bildart
1	$g > 2f$	$f < b < 2f$	$B < G$	reell, umgekehrt
2	$g = 2f$	$2f = b$	$B = G$	reell, umgekehrt
3	$f < g < 2f$	$b > 2f$	$B > G$	reell, umgekehrt
4	$g = f$	$b = \infty$	$B = \infty$	reell, umgekehrt
5	$g < f$	$b < 0$	$B > G$	virtuell, aufrecht



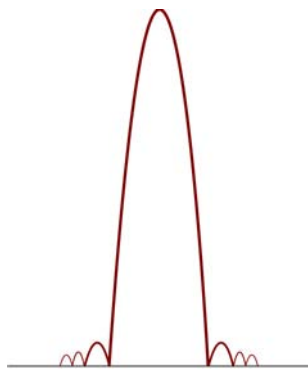
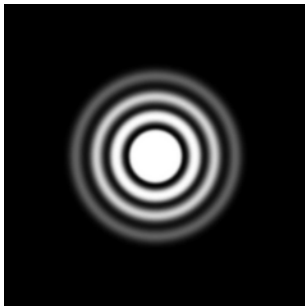
1.1.5.4 Auflösungsvermögen

Unter dem Auflösungsvermögen versteht man die Fähigkeit eines optischen Instrumentes Objektdetails getrennt abbilden zu können. Also den Abstand den 2 Punkte haben können um noch als 2 getrennte Strukturen erkennbar zu sein.

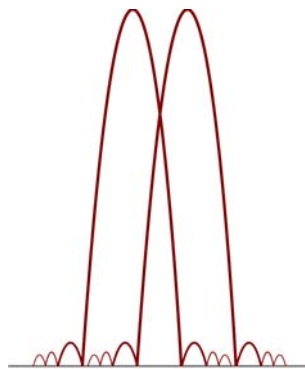
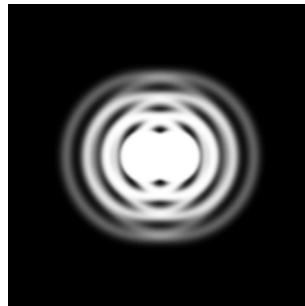
Durch die Beugungseffekte an den Strukturen treten wie im Kapitel Beugung besprochen mehrere Maxima auf. Zur Definition des Auflösungsvermögens wird daher in der Regel das Rayleigh-Kriterium verwendet.

Das Rayleigh-Kriterium besagt, daß sich zwei Beugungsscheibchen (**Airy-Discs**) gleicher Helligkeit und Farbe noch trennen lassen, wenn das Minimum des ersten mit dem Maximum des zweiten zusammenfällt, also sich die beiden Maxima 0. Ordnung gerade nicht mehr überschneiden.

Die zur Bestimmung der Auflösung verwendeten Airy-Discs sind an einer Lochblende gebeugte Lichtstrahlen.

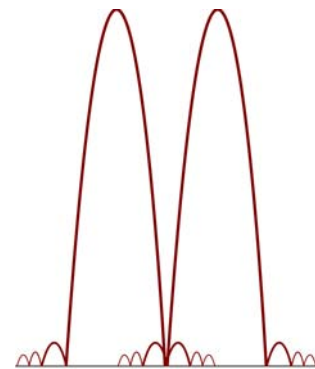
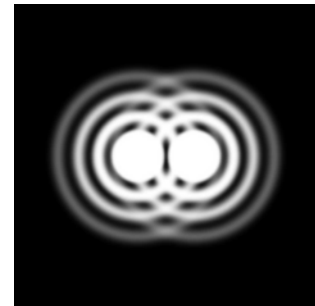


1 Airy Disc - **Beugungsbild**



2 Airy Discs - **nicht aufgelöst**

Maxima 0. Ordnung
überschneiden sich

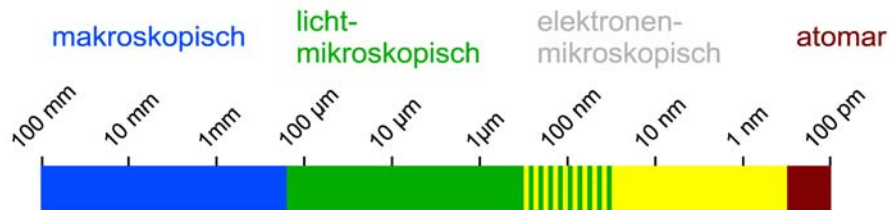


2 Airy Discs – **aufgelöst**

Maxima 0. Ordnung
überschneiden sich nicht



1.1.5.5 Auflösungsgrenzen

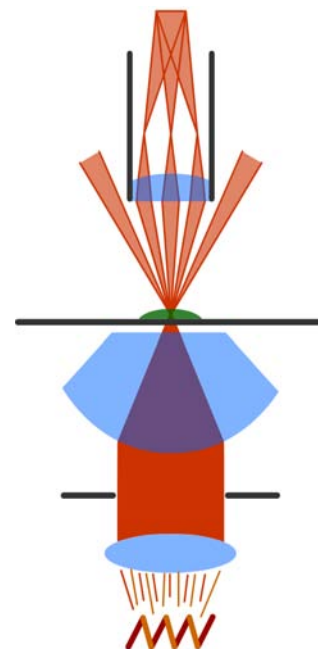


- Mit freiem Auge sind Strukturen bis zu einer Größe von höchstens 0,2 mm erkennbar.
zB: Flöhe, Riesenamöben
- Für kleiner Objekte ist eine Lupe oder ein Mikroskop erforderlich. Mit einem Lichtmikroskop lassen sich Strukturen bis zu einer Größe von 500 nm auflösen, mit Videomikroskopie oder Dunkelfeld sogar bis zu 50 nm.
zB: Chloroplasten, rote Blutkörperchen, Mitochondrien, Bakterien, Cilien
- Bei Größenordnungen unter 500 nm ist eine Auflösung nur mehr mit dem Elektronenmikroskop möglich. Die untere Grenze für Elektronenmikroskope liegt bei etwa 0,5 nm., Mit speziellen und extrem leistungsstarken Elektronenmikroskopen können allerdings auch noch einzelne Atome dargestellt werden.
zB: Cilien, Mykoplasmen, Mikrotubuli, Ribosomen, DNS-Doppelhelix, H₂O-Molekül

1.1.5.6 Mikroskop-Auflösung / Abbe-Theorie

Die Abbe'sche Theorie der Mikroskop-Auflösung geht wie bei den Airy-Discs davon aus, dass jedes Objekt Beugungseffekte hervorruft. Das bedeutet, dass die Bildinformation des Objektes auf die Beugungsmaxima aufgeteilt wird!! Je mehr Maxima eines Objektes nun für die Bildgebung genutzt werden können, desto mehr Informationen sind über das Objekt vorhanden und umso höher ist daher auch die Auflösung.

Die Öffnung eines Objektivs (Apertur) ist aber nicht unendlich groß, sodass nicht alle Maxima eingefangen werden können. Um eine minimale Strukturinformation und damit eine Auflösung zu erhalten müssen mindesten Maxima der nullten und ersten Ordnung erfasst werden. Ist die Objektivöffnung zu klein, gelangen die Maxima der ersten Ordnung nicht mehr ins Objektiv und es kann kein Bild entstehen.

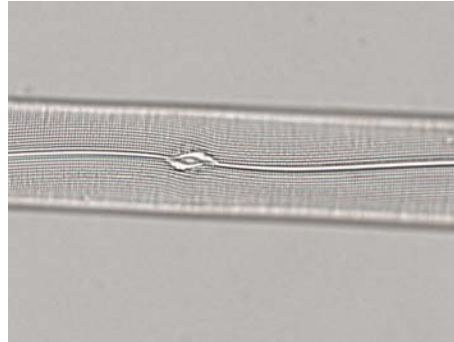
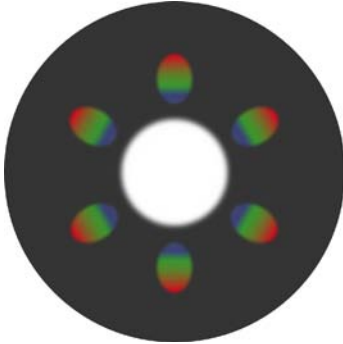




Numerische Apertur

Blickt man mit einem Einstellfernrohr in die hintere Brennebene des Objektivs so sieht man bei hoher Apertur in der Mitte das helle Bild des Maximums 0. Ordnung umgeben von den Beugungsbildern der Maxima 1. Ordnung.

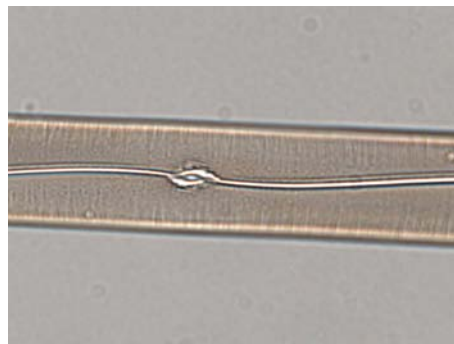
Durch die Interferenz dieser beiden Maxima kann ein voll aufgelöstes Bild erzeugt werden.



aufgelöste Strukturen

Bei zu kleiner numerischer Apertur gelangen die Maxima 1. Ordnung nicht mehr in des Objektiv oder sie werden von die Objektivblende geblockt.

Zur Bildgebung steht hier nur das 0. Maximum zur Verfügung. Diese Bildinformationen reichen aber nicht aus um die Strukturen völlig aufzulösen.



nicht aufgelöste Strukturen

Wellenlänge

Das Auflösungsvermögen wird neben der numerischen Apertur von Objektiv und Kondensator auch von der Wellenlänge des Lichtes beeinflusst; je kürzer die Wellenlänge desto höher die Auflösung. Wobei generell monochromatisches Licht (also Licht einer Wellenlänge) die Bildqualität verbessert, weil dadurch weniger chromatische Fehler auftreten.

Das Auflösungsvermögen lässt sich nun mit folgender Formel berechnen.

$$d = \lambda / (NA \text{ obj.} + NA \text{ cond.})$$

λ = Wellenlänge des Lichts

NA = numerische Apertur von Objektiv und Kondensator



1.1.5.7 Qualität von Optiken

Lupen, Kameras, Mikroskope und Ferngläsern sind aus Linsen oder Linsensystemen aufgebaut, diese sind immer der zentrale Bestandteil eines optischen Gerätes und dessen Bildqualität.

Linsenfehler beeinträchtigen daher die Bildqualität massiv, aus diesem Grund werden für hochwertigere optische Geräte nur korrigierte Linsen und Linsensysteme verwendet.

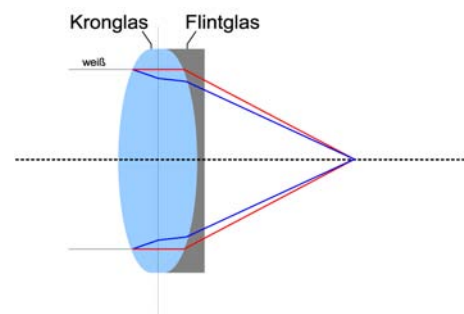
Je nach Qualität der Linsen sind ein oder mehrerer Fehler korrigiert.

Achromate

Bei achromaten Optiken ist die chromatische Aberration für rot und blau sowie meistens auch die sphärische Aberration gehoben.

Dazu werden 2 dünne Linsen aus Gläsern mit extremen Eigenschaften (Fluorkronglas, Kalziumfluorid oder spezielles Kurzflintglas) verwendet. Die beiden Linsen grenzen direkt aneinander und sind meistens miteinander verkittet. In anderen Fällen bleibt ein kleiner Luftspalt zwischen den Linsen; dieser erzeugt eine zusätzlich Lichtbrechung die auch eine Korrektur der sphärischen Aberration ermöglicht.

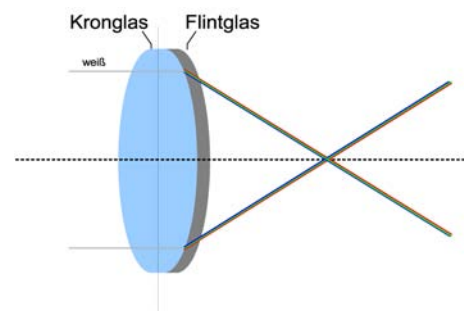
Achromaten stellen die preisgünstige Lösung von korregierten Linsen dar und eignen sich im Routinebetrieb hervorragend für Hellfeld und Phasenkontrast.



Apochromate

Bei Apochromaten Linsensystemen sind Farbfehler vollständig beseitigt, also die chromatische Aberration für rot, blau und grün gehoben.

Das Prinzip ist gleich wie bei achromaten Systemen nur das durch den Einsatz eines dritten Linsenmaterials auch noch das beim Achromaten verbleibende sekundäre (grüne) Spektrum gehoben wird.





Fluorite

Durch besondere Materialien wie Fluorit-Glas und "ED" (extreme low dispersion) Glas kann das sekundäre Spektrum auch mit einer an sich nur achromatischen Konstruktion stark verringert werden.

Fluorit besitzt die Eigenschaft das Lichtspektrum gleichmäßig zu brechen, damit lässt sich die Chromatische Aberration von Objektiven mit weniger Linsen ausgleichen als mit herkömmlichen Materialien.

Fluorit-Objektive haben den Vorteil, dass weniger Linsen zusammengesetzt sind, damit wird der Lichtverlust durch das optische System reduziert. Durch dieses Verfahren erhält man kontrastreiche Bilder mit optimaler Qualität.

Planobjektive

Planobjektive besitzen die aufwendigste Konstruktion von allen optischen Systemen. Bei diesen Objektiven ist die störende Bildfeldwölbung weitgehend beseitigt.

Zusätzlich kann bei diesen Objektiven auch noch die chromatische Aberration gehoben sein. Je nach Art der Korrektur spricht man dann von Planachromaten oder Planapochromaten.

Objektive dieser Art sind sehr teuer und werden in erster Linie für Mikroskopietechniken verwendet die auf besonders gute Qualität und Auflösung angewiesen sind.

Vergütung

Vergütung ist eine Behandlung optischer Gläser, bei der auf das Glas eine dünne Schicht mit geringerer Brechkraft (z.B. Magnesiumfluorid) aufgebracht wird. Vergütung wird zum Beispiel bei optischen Geräten (Mikroskop- und Foto-Objektive, Ferngläser) sowie bei Brillen angewendet. Am Übergang zwischen Luft und Glas beträgt die Reflexion je nach Glassorte und Einfallswinkel etwa 4-9 % des einfallenden Lichtes. Bereits mit einer einfachen Vergütung kann dieser Wert auf unter ein Prozent reduziert werden. Das wirkt sich besonders bei Systemen aus mehreren Linsen positiv aus, aufwändige Linsensysteme mit zehn oder mehr Linsen wären ohne Vergütung praktisch nicht einsetzbar.

Vergütete Flächen sind besonders empfindlich gegen mechanische Einwirkung (zerkratzen extrem leicht) und können daher nur schwer gereinigt werden. Ausgenommen sind nach außen zeigende Linsenflächen welche „hart“ vergütet sind und vorsichtig gereinigt werden können.