

Kapitel 10

GEOMETRISCHE OPTIK UND MIKROSKOP

LERNZIELE

- Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und in durchsichtigen Materialien
- Definition des Brechungsindex
- Wellenlänge und Frequenz in durchsichtigen Materialien
- Brechungsgesetz von Snellius
- Reflexion an Oberflächen
- Reflexionskoeffizient für parallel und senkrecht polarisiertes Licht
- Brewster Winkel
- Totalreflektion
- Evaneszente Welle bei der Totalreflektion
- Paraxiale Näherung und Brennweite einer dünnen Linse
- Brechkraft einer Linse in Dioptrien
- Konstruktion eines reellen Bildes
- Konstruktion eines virtuellen Bildes
- Verständnis was „virtuelles Bild“ bedeutet
- Berechnung des Abbildungsmaßstabs bei reellen und virtuellen Bildern
- Kenntnis wesentliche Linsenfehler (sphärische Aberration, Koma, Bildfeldwölbung, chromatische Aberration)
- Kenntnis der Funktion eines Achromaten
- Funktion von Objektiven im Gegensatz zu Einzellinsen
- Prinzipieller Strahlengang in einem Mikroskop mit Zwischenbildebene
- Kleinste erkennbare Strukturgröße, die mit einem Mikroskop aufgelöst werden kann.
- Definition der numerischen Apertur
- Strahlengang in modernen Mikroskopen

INHALT

Lichtgeschwindigkeit

Im Vakuum beträgt die Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 299.792.458$ m/s. Licht legt also ungefähr 300.000 km/s – etwas weniger als die Entfernung Erde-Mond in einer Sekunde zurück.

In durchsichtigen Materialien wie Wasser oder Glas ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner. Den Unterschied in der Lichtgeschwindigkeit beschreibt man mit dem Brechungsindex n . Die Lichtgeschwindigkeit in einem durchsichtigen Material mit dem Brechungsindex n kann wie folgt berechnet werden.

$$c = \frac{c_0}{n}$$

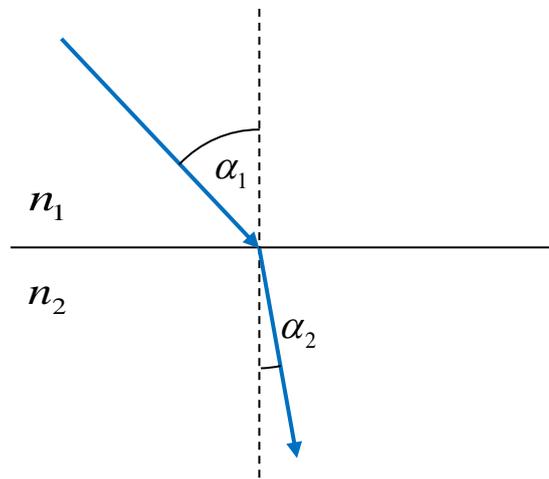
Durch die geringere Lichtgeschwindigkeit verkürzt sich die Wellenlänge im Glas und Wasser, die Frequenz des Lichtes bleibt aber gleich. Für die Wechselwirkung mit Materie z.B. die Anregung von Atomen ist immer die Frequenz des Lichtes entscheidend, daher wirkt Licht auf Atome unter Wasser genauso wie Licht der gleichen Frequenz im Vakuum. Die Änderung der Wellenlänge hängt also nur mit der verringerten Ausbreitungsgeschwindigkeit zusammen und hat außer der Ablenkung des Lichtes keine weiteren Auswirkungen. Auch die Farbe des Lichtes ändert sich nicht unter Wasser, da die Farbwahrnehmung mit der Wechselwirkung des Lichtes mit den Molekülen in den Farbrezeptoren unserer Netzhaut zusammenhängt, die durch die Frequenz des Lichtes bestimmt ist.

Brechungsgesetz

Licht das schräg auf eine Glasoberfläche oder Wasseroberfläche trifft, wird abgelenkt das heißt, an der Oberfläche gebrochen. Beim Eintritt von einem Lichtstrahl aus der Luft in das sogenannte optisch dichtere Medium wie z.B. Wasser oder Glas wird der Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen. Der Winkel der zwischen Lichtstrahl und Lot gemessen wird verkleinert sich also beim Eintritt in das optisch dichtere Medium. Das Snelliussche Brechungsgesetz lautet wie folgt.

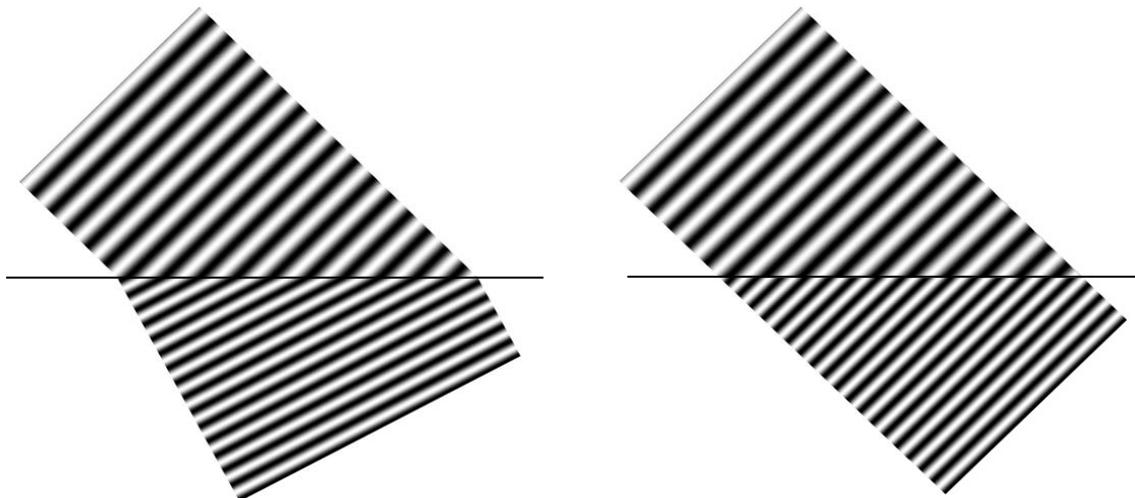
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1}$$

Dabei sind n_1 und n_2 die Brechungsindizes der beiden Medien, z.B. Luft und Wasser. α_1 und α_2 sind die Winkel zwischen Lichteinfall und Lot in dem jeweiligen Medium.



Licht kann natürlich auch den umgekehrten Weg nehmen und aus Wasser oder Glas austreten, dann wird es vom Lot weggebrochen. Es gilt das gleiche Gesetz und es müssen die passenden Winkel und Brechungsindizes der Substanzen eingesetzt werden. Luft hat den Brechungsindex $n = 1,0$ Wasser hat $n = 1,33$ und Glas je nach Glassorte ungefähr $n = 1,5$.

Die Ursache für die Brechung kann man sich an folgendem Bild veranschaulichen.



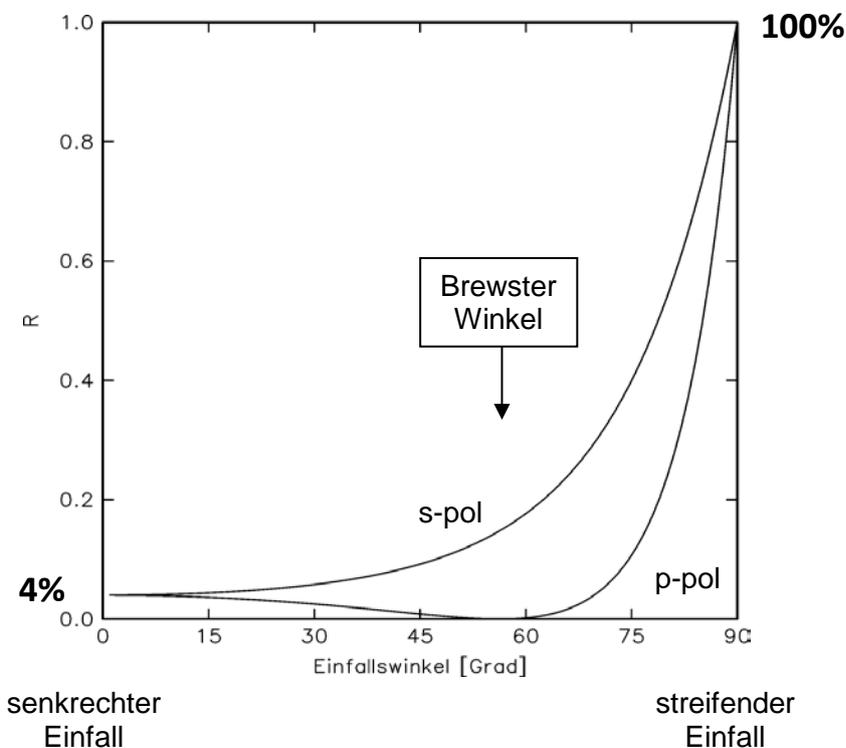
Durch die kürzere Wellenlänge des Lichtes im optisch dichteren Medium (jeweils unten im Bild) muss die Ausbreitung eine andere Richtung haben, damit die Wellenberge und Wellentäler der Welle an der Grenzfläche zusammenpassen (linkes Bild). Würde das Licht nicht abgelenkt, dann würden Wellenberge und Wellentäler an der Grenzfläche nicht zusammenpassen (rechtes Bild).

Reflexion

Neben der Brechung an der Oberfläche tritt auch immer Reflexion an einer Oberfläche auf. Das kennen wir alle von Spiegelungen an Wasseroberflächen oder Glasoberflächen. Im Gegensatz zu einem normalen Spiegel (mit versilberter Rückseite) wird aber nur ein Teil des Lichtes reflektiert, der Rest wird gebrochen.

Trifft Licht senkrecht auf eine Glasoberfläche werden z.B. 4% des Lichtes reflektiert und 96% durch die Oberfläche transmittiert. Der Reflexionskoeffizient hängt aber vom Winkel und der Polarisation des Lichtes ab. Licht des parallel zur Einfallsebene polarisiert ist, wird bei

zunehmenden Einfallswinkel weniger reflektiert bis es am sogenannten Brewster-Winkel überhaupt nicht mehr reflektiert, sondern vollständig durch die Oberfläche transmittiert wird. Bei Winkeln größer als dem Brewster-Winkel nimmt die Reflexion dann rapide zu und erreicht beim streifenden Einfall fast 100%. Licht das senkrecht zur Einfallsebene polarisiert ist, wird bei senkrechtem Einfall mit 4% reflektiert, bei zunehmendem Einfallswinkel wird es immer stärker reflektiert, bis es bei streifendem Einfall auch 100% Reflexion erreicht.



Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die Reflexion insbesondere an abrupten Änderungen des Brechungsindexes auftritt. Würde sich der Brechungsindex an einer „unscharfen“ Grenzfläche kontinuierlich ändern, dann wäre der Reflexionskoeffizient sehr viel kleiner. Wenn sich die Konzentration einer Lösung in einem Übergangsbereich stark ändert, kann sich damit auch der Brechungsindex ändern. Das Licht wird beim Durchgang durch diesen Bereich abgelenkt ohne, dass in diesem Fall Reflexion auftritt.

Totalreflexion

Wenn Licht von einem optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres Medium fällt, dann gibt es einen Winkel, ab dem die sogenannte Totalreflexion auftritt. Fällt Licht streifender als der Grenzwinkel der Totalreflexion auf die Grenzfläche, dann wird es zu 100% reflektiert. Der Grenzwinkel der Totalreflexion ist gerade der Winkel, bei dem das Licht, wenn es in dem dünneren Medium vom Lot weggebrochen wird, parallel zur Oberfläche verlaufen würde. Bei der Totalreflexion gibt es eine sogenannte evaneszente Welle, die in das optisch dünnere Medium eintritt und darin exponentiell abfällt. Die Eindringtiefe dieser evaneszente Welle hängt vom Einfallswinkel des Lichtes ab. In der Nähe des Grenzwinkels ist die Eindringtiefe groß und nimmt mit zunehmendem Einfallswinkel ab. In der folgenden Abbildung ist die evaneszente Welle zu sehen. In der unteren Hälfte ist das optisch dichtere Medium hier Glas ($n = 1,5$) und in der oberen Hälfte das optisch dünneren Medium hier Luft ($n = 1$) zu sehen.

Aufgrund der Totalreflexion interferieren die einfallende und reflektierte Welle im dichten Medium und bilden das Schachbrettmuster, das sich parallel zur Oberfläche bewegt.

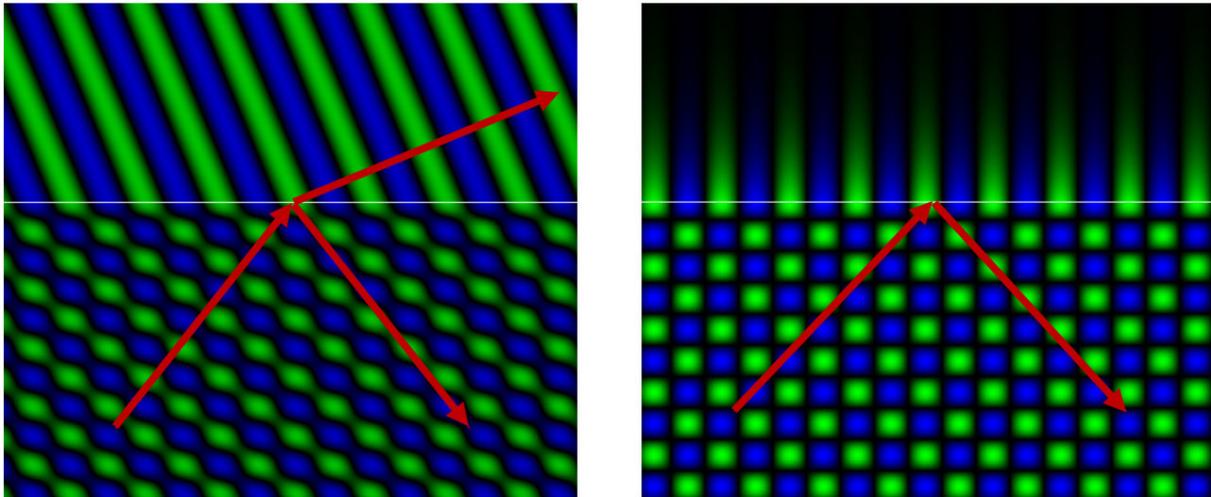
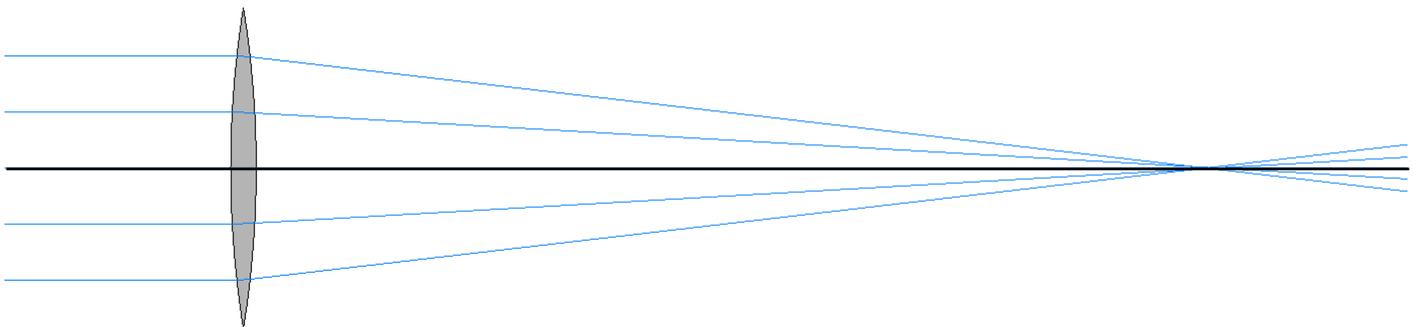


Abbildung Brechung (links) und Totalreflexion (rechts): Das Licht fällt von unten links nach rechts oben (roter Pfeil) auf die Grenzfläche (weiße Linie) zwischen Glas (unten) und Luft (oben). Wellenberge sind blau und Wellentäler grün dargestellt. Im linken Bild beträgt der Einfallswinkel 38° und das Licht wird vom Lot weg gebrochen. Im rechten Bild tritt bei einem Einfallswinkel von 43° Totalreflexion auf. Oberhalb der weißen Linie ist die evaneszente Welle zu erkennen, die exponentiell nach oben abklingt.

Dünne Linsen

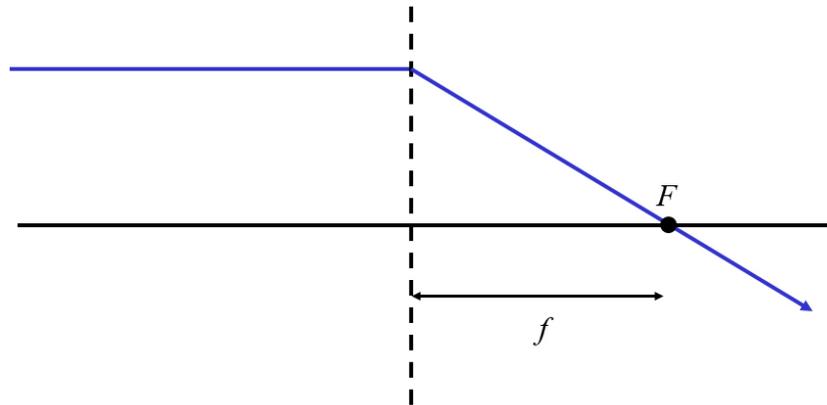
Dünne Linsen bestehen aus Glas und haben zwei hemisphärische Oberflächen. Sie sind dünn gearbeitet und können zum Fokussieren von Licht eingesetzt werden. Wir betrachten hier eine bikonvexe Linse. In der folgenden Abbildung fällt paralleles Licht auf die Linse und wird an beiden Glasoberflächen gebrochen. Dadurch verläuft das Licht nun konzentrisch auf einen Punkt zu, den man Brennpunkt nennt. Weiterhin führt man eine sogenannte optische Achse ein, die durch beide Mittelpunkte der Linsenkrümmung verläuft. Auf ihr liegt auch der Brennpunkt.



Bei einfachen Aufbauten verwendet man die sogenannte paraxiale Näherung, die auch Gaußsche Näherung genannt wird, zur Berechnung von Gegenstands-, Bild-, und Brennweiten. Dabei betrachtet man hauptsächlich Strahlen, die unter kleinen Winkeln zur optischen Achse und in der Nähe der optischen Achse verlaufen. Wir werden später sehen, dass man diese Näherung nicht verwenden kann, wenn man reale Linsensysteme wie z.B. ein Mikroskop-Objektiv verstehen möchte. Dennoch ist es von Vorteil, einige einfache Zusammenhänge in dieser Näherung zu betrachten.

Brennweite

Im Folgenden Bild ist der Strahlenverlauf für eine dünne Linse schematisch gezeigt, wie man es in solchen Konstruktionen üblicherweise verwendet. Die Linse ist mit ihrer Hauptebene als gestrichelte Linie eingezeichnet, die optische Achse als durchgehende schwarze Linie. Ein Lichtstrahl, der parallel zur optischen Achse auf die Linse fällt, wird so gebrochen, dass er durch den Brennpunkt F läuft. Der Abstand von der Hauptebene zum Brennpunkt wird Brennweite f genannt.



Brechkraft

Der Kehrwert der Brennweite wird auch Brechkraft einer Linse genannt und in der Einheit Dioptrien gemessen.

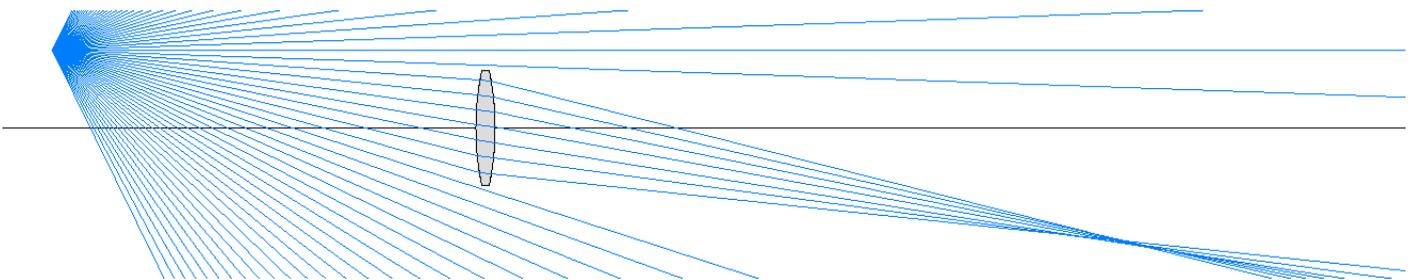
$$\Phi = \frac{1}{f}$$

Eine Linse mit einem Dioptrien hat eine Brennweite von einem Meter. Eine Linse mit 2 dpt hat eine Brennweite von 0,5 m. Bringt man mehrere dünne Linsen hintereinander, dann addieren sich ihre Brechkräfte.

$$\Phi_{ges} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots$$

Reelles Bild

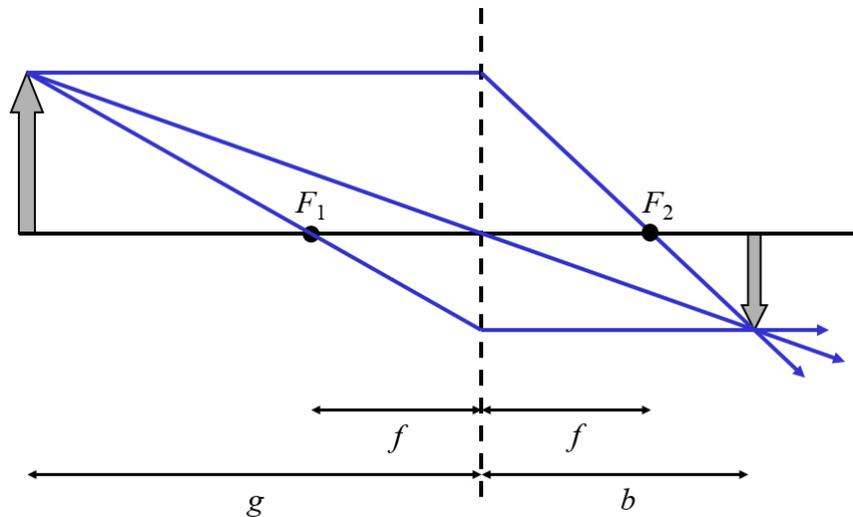
Betrachten wir einen Punkt, von dem Licht ausgeht (oben links im folgenden Bild). Das kann zum Beispiel eine Lichtquelle oder ein beleuchteter Fleck sein, von dem Streulicht in alle Richtungen ausgeht, wie es in der folgenden Abbildung als blaue Linien dargestellt ist.



Fällt dieses Licht durch eine dünne Linse, dann wird es fokussiert und an einem anderen Punkt gebündelt. Bringt man an diesem Punkt eine weiße Fläche, das heißt einen Schirm, dann kann

man ein Bild des Fleckes an dieser Stelle auf dem Schirm beobachten. Diesen Punkt nennt man ein reales Bild des Punktes von dem die Strahlen ursprünglich ausgegangen waren.

Im Folgenden Bild ist die schematische Konstruktion gezeigt, die man für diesen Fall verwendet.



Links im Bild ist ein grauer Pfeil zu sehen, von dessen Spitze aus Lichtstrahlen in alle Richtungen verlaufen. Es sind in der Abbildung aber nur drei spezielle Strahlen gezeigt, die für die Konstruktion verwendet werden. Erstens ein horizontaler Strahl (parallel zur optischen Achse) der auf die Linse fällt und in den sogenannten Brennpunktstrahl durch F_2 gebrochen wird. Zweitens ein Brennpunktstrahl der durch F_1 läuft und an der Linse in einen horizontalen Strahl (Parallelstrahl) gebrochen wird. Der dritte Strahl ist der sogenannte Mittelpunktstrahl, der ohne Brechung durch die Mitte der Linse verläuft. Alle drei Strahlen treffen sich in dem Bildpunkt. Das Bild ist als grauer Pfeil auf der rechten Seite eingezeichnet und steht auf dem Kopf. Weiterhin eingezeichnet sind die beiden Brennpunkte F_1 und F_2 , die beide den gleichen Abstand zur Linse f haben. Wenn auf beiden Seiten der Linse Luft ist, dann sind die Brennweiten immer auf beiden Seiten der Linse gleich groß. Zusätzlich eingezeichnet ist die Gegenstandsweite g und die Bildweite b .

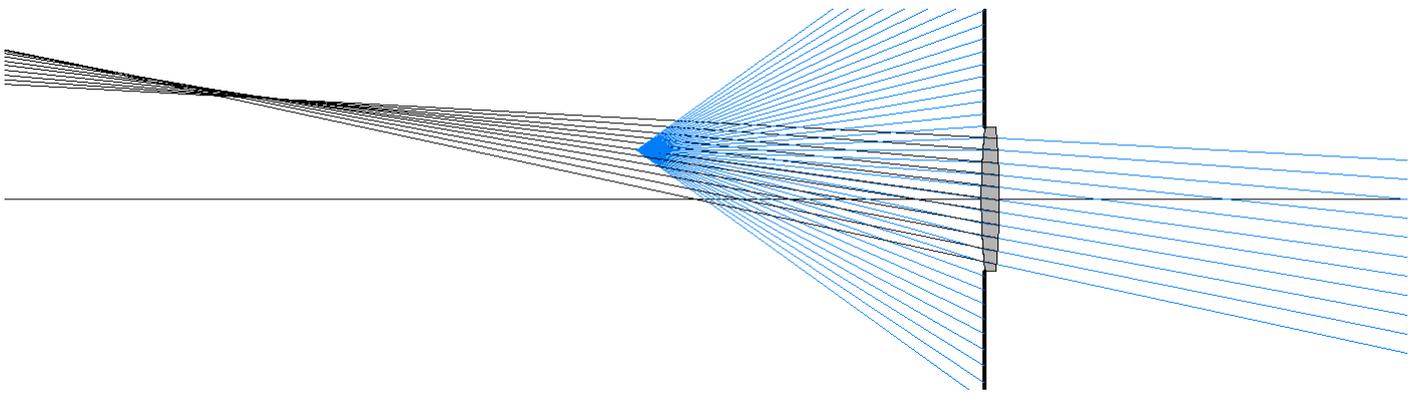
Linsenformel

Gegenstandsweite g und die Bildweite b hängen wie folgt mit der Brennweite f der Linse zusammen

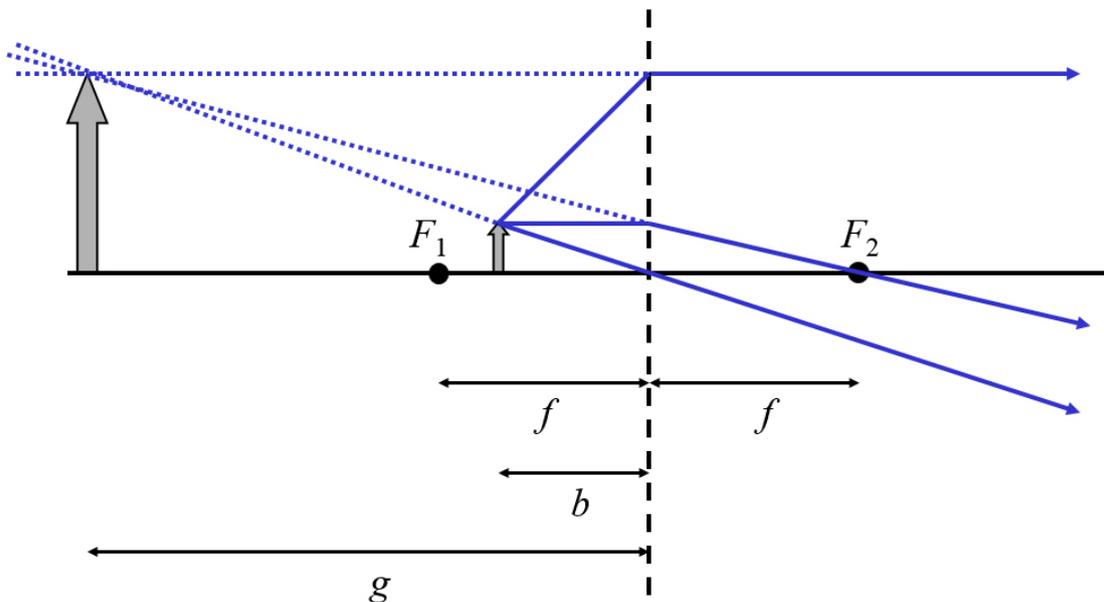
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

Virtuelles Bild

Neben dem reellen Bild gibt es auch sogenannte virtuelle Bilder. Befindet sich der Gegenstandspunkt, von dem die Lichtstrahlen ausgehen, dichter an der Linse als ihre Brennweite, dann werden die Strahlen hinter der Linse nicht mehr so stark fokussiert, dass sie sich in einem Bildpunkt treffen, sondern bleiben divergent. Dies ist im folgenden Bild anhand der blauen Strahlen auf der rechten Seite erkennbar.



Wenn man von der rechten Seite in den divergenten Strahl mit dem eigenen Auge oder mit einer Kamera hineinblickt, dann denkt das Auge (Gehirn), die Strahlen seien von einem Punkt ausgegangen, der als Schnittpunkt der schwarzen Linien auf der linken Seite des Bildes erkennbar ist. Die schwarzen Linien sind einfach die geraden Verlängerungen der blauen Linien von der rechten Seite. Unser Gehirn geht immer davon aus, dass Lichtstrahlen geradlinig verlaufen. Wenn keine Linse dort gewesen wäre, dann wären die Strahlen entlang der schwarzen Linien verlaufen und wären von einem Gegenstand gekommen, der sich auf der linken Seite im Schnittpunkt der schwarzen Strahlen befunden hätte. Das Auge nimmt ein Bild wahr, das diesen Gegenstand an diesem Ort zeigt. Dies nennt man ein virtuelles Bild. In der nachfolgenden Abbildung ist die schematische Zeichnung für die Konstruktion eines virtuellen Bildes gezeigt.



Der Gegenstand ist der kleine Pfeil rechts neben dem Brennpunkt F_1 . Von ihm gehen drei Strahlen aus, ein horizontaler Strahl (Parallelstrahl) nach rechts der an der Linse in den Brennpunktstrahl, der durch F_2 geht, gebrochen wird. Ein Brennpunktstrahl verläuft als wäre er von F_1 ausgegangen, durch den Gegenstandspunkt (Pfeilspitze) und trifft dann auf die Linse. Dort wird er in einen horizontalen Strahl (Parallelstrahl) gebrochen. Weiterhin gibt es einen Parallelstrahl, der in den Brennpunktstrahl durch F_2 gebrochen wird. Der dritte Strahl ist der Mittelpunktstrahl.

Alle drei Strahlen verlaufen auf der rechten Seite divergent. Daher gibt es kein reelles Bild auf der rechten Seite. Verlängert man die blauen Strahlen von der rechten Seite nach links, hier als gestrichelte Linien dargestellt, dann treffen sie sich in einem Punkt. Dies ist der virtuelle

Bildpunkt. Und der große Pfeil auf der linken Seite ist das virtuelle Bild von dem kleinen Pfeil. Weiterhin sind die Brennweite der Linse die Gegenstandsweite g und die Bildweite b eingezeichnet. Die Bildweite wird negativ gerechnet, weil sie nicht wie üblich rechts sondern links vorgefunden wird.

Abbildungsmaßstab

Der Abbildungsmaßstab β ist das Verhältnis aus der Größe des Bildes dividiert durch die Größe des Gegenstandes. Er berechnet sich aus Bildweite b und Gegenstandsweite g wie folgt.

$$\beta = -\frac{b}{g}$$

Ist der Abbildungsmaßstab größer als 1 oder kleiner als -1, dann ist das Bild größer als der Gegenstand. Liegt der Abbildungsmaßstab zwischen -1 und 1, dann ist das Bild kleiner als der Gegenstand. Wenn der Abbildungsmaßstab negativ ist, dann bedeutet dies, dass das Bild andersherum orientiert ist als der Gegenstand (auf dem Kopf steht). Bei dem obigen Beispiel des reellen Bildes sind Gegenstandsweite und Bildweite positiv, wodurch der Abbildungsmaßstab negativ wird - das Bild steht auf dem Kopf. Bei dem obigen Beispiel des virtuellen Bildes ist die Bildweite negativ, wodurch der Abbildungsmaßstab positiv wird - das Bild steht aufrecht.

Der Abbildungsmaßstab darf nicht mit der Vergrößerung verwechselt werden.

Optik jenseits der paraxialen Näherung

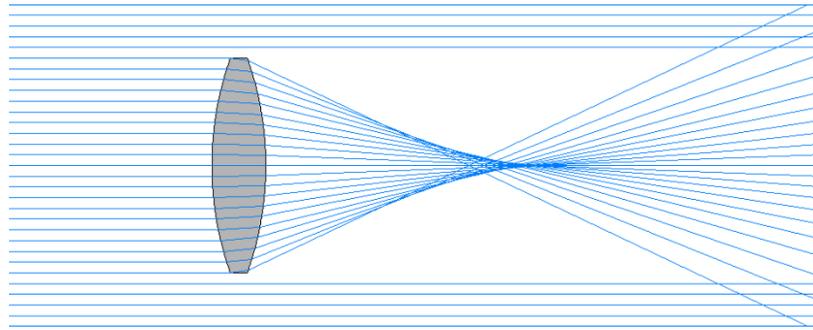
Moderne optische Instrumente haben große Linsenöffnungen und große Akzeptanzwinkel für das Licht. Während bei Fernrohren die Akzeptanzwinkel noch relativ klein sind, sind sie bei Fotoobjektiven bereits im Bereich von 45° und mehr. Am größten sind sie bei Mikroskopobjektiven mit großer numerische Apertur, bei denen sie im Bereich von 80 Grad liegen können. Eine paraxiale Näherung ist daher für solche Objektive unbrauchbar. Wir werden uns im Folgenden mit den sogenannten Linsenfehlern (aberrationen) beschäftigen. Das sind einzelne Effekte die jenseits der paraxiale Näherung auftreten. Es handelt sich dabei nicht um fehlerhaft hergestellte Linsen, sondern um Abweichungen von der paraxiale Näherung, die bei perfekt hemisphärisch geschliffenen Linsen unter großen Winkeln und Abständen von der optischen Achse auftreten.

Linsenfehler

Sphärische Aberration

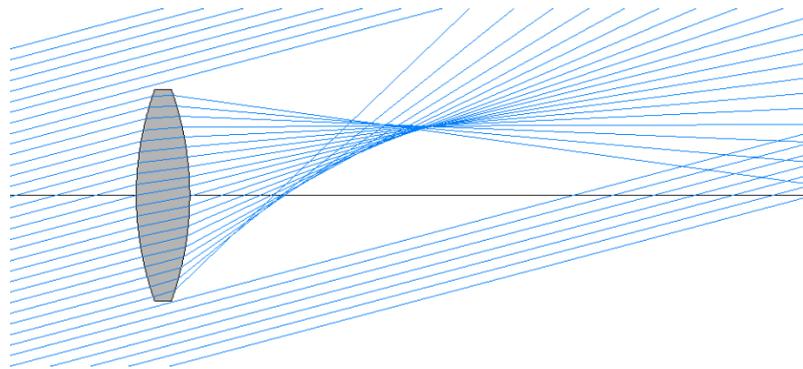
Wenn Licht parallel zur optischen Achse mit großem Abstand von der optischen Achse auf eine Linse fällt, dann verläuft der gebrochene Strahl nicht mehr genau durch den Brennpunkt. Die Brennweite für die äußeren Strahlen verkürzt sich zunehmend wie es im folgenden Bild gut sichtbar ist. Daher gibt es nun keinen Punkt mehr hinter der Linse, an dem ein perfekt scharfes reelles Bild auf einem Schirm aufgefangen werden kann. In Objektiven kann die sphärische

Aberration durch die Kombination mehrerer Linsen mit unterschiedlichen Krümmungen korrigiert werden. Ein Linsensystem das frei von sphärischer Aberration ist nennt man Aplanat.



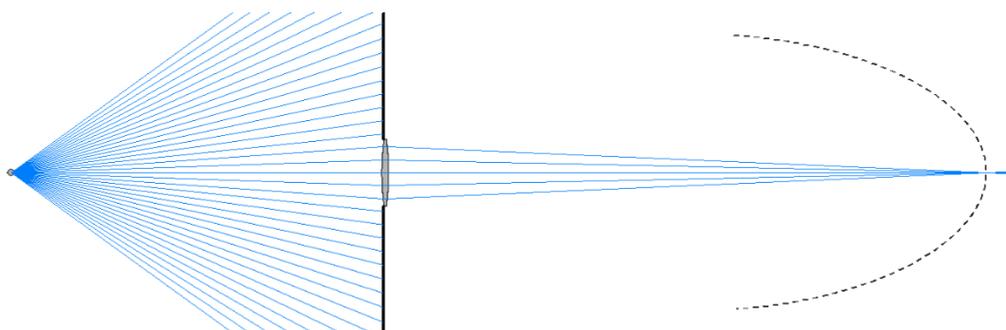
Koma und Astigmatismus

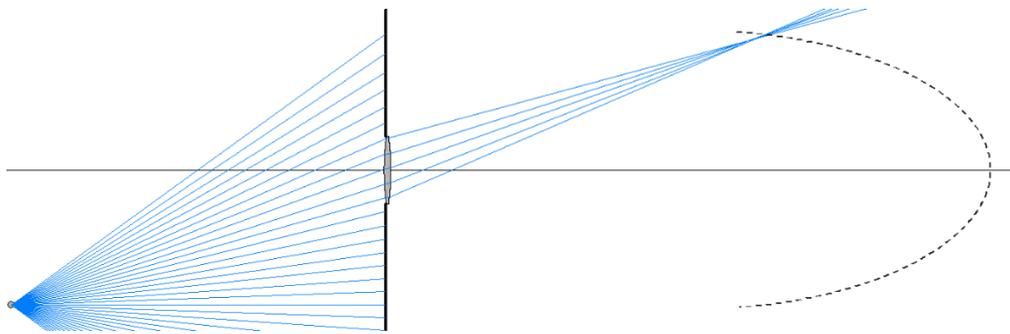
Treffen parallele Lichtstrahlen schräg auf die Linse, dann tritt zusätzlich zur sphärischen Aberration noch das sogenannte Koma auf. Dies führt zu einer noch stärkeren asymmetrischen Verformung des Bildpunktes. Weiterhin tritt bei schrägem Einfall der sogenannte Astigmatismus auf, das heißt, dass Lichtstrahlen die oben und unten auf die Linse treffen eine andere Brennweite haben als Lichtstrahlen die rechts und links auf die Linse treffen. Sphärische Aberration, Koma und Astigmatismus führen also zu asymmetrischen Aufweitungen des Bildpunktes in ein unscharfes Scheibchen das auf einem Schirm abgebildet wird.



Bildfeldwölbung

Schräg durch eine Linse fallende Strahlen haben eine kürzere Brennweite als Strahlen die parallel zur optischen Achse verlaufen. Dadurch wird das Bild eines ebenen Gegenstandes nicht mehr auf einer ebenen Bildfläche scharf abgebildet. Dadurch entsteht eine sogenannte Bildfeldwölbung, die in der folgenden Abbildung gut erkennbar ist. Wie man sieht, ist bei sehr schrägem Einfall (unteres Bild) eine erhebliche Verkürzung der Brennweite gegeben, sodass ohne Korrektur dieses Effektes eine Abbildung z.B. auf ein flaches CCD-Array in einer Kamera nicht möglich wäre.





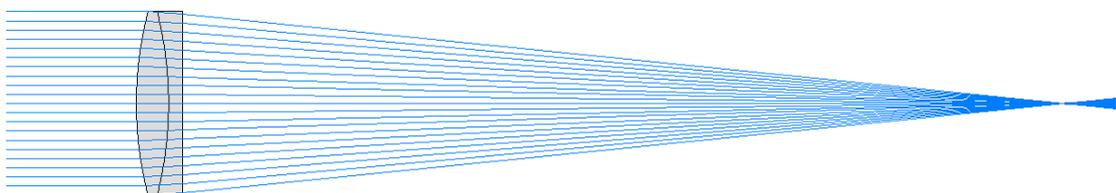
Chromatische Aberration

Die bisher besprochenen Linsenfehler nennt man auch monochromatische Aberrationen. Sie treten für Licht einer Wellenlänge auf. Zusätzlich gibt es chromatische Aberrationen. Das sind Linsenfehler, die auftreten, wenn Licht unterschiedlicher Wellenlänge durch eine Linse fällt. Dies ist selbstverständlich bei allen farbigen Abbildungen der Fall. Glas hat für unterschiedliche Farben einen unterschiedlichen Brechungsindex. Dadurch wird Licht unterschiedlicher Wellenlänge auch unterschiedlich stark gebrochen. Dadurch hat eine Linse für blaues Licht eine kürzere Brennweite als für rotes Licht. Diese Eigenschaft nennt man Dispersion des Glases. Sie wird mit der Abbe-Zahl quantifiziert. Hat Glas eine Abbe-Zahl kleiner als 50, dann ist die Dispersion klein und der Unterschied der Brennweiten vergleichsweise klein. Man nennt solches Glas Kronglas. Ist die Abbe-Zahl größer als 50, dann nennt man das Glas Flintglas und der Unterschied zwischen den Brennweiten von rotem und blauem Licht ist größer als bei Kronglas. Ein Prisma aus Flintglas würde ein Spektrum von weißem Licht also weiter in die Spektralfarben auffächern als ein Prisma aus Kronglas.

Abbildungen mit Einfachlinsen oder Objektiven, die nicht gut bzgl. der chromatischen Aberration korrigiert sind, zeigen an Bildpunkten farbige, meistens rote oder blaue Ränder. Ein weißer Gegenstandspunkt wird in einen scharfen roten Punkt und ein unscharfes blaues Bildscheibchen abgebildet oder umgekehrt.

Achromat

Die chromatische Aberration einer Einzellinse kann man nun durch einen Trick korrigieren. Man kombiniert eine Zerstreuungslinse aus Flintglas und eine Sammellinse aus Kronglas. Diese Kombination aus Linsen hat immer noch eine fokussierende Wirkung, wenn die Sammellinse stärker fokussiert als die Zerstreuungslinse zerstreut. Durch die Kombination der unterschiedlichen Glassorten kann man aber die chromatische Aberration genau zu Null kompensieren. Ein solches Duplett aus zwei Linsen nennt man Achromat. Viele Achromate werden so gebaut, dass die Zerstreuungslinse und die Sammellinse ohne Zwischenraum verkittet werden. Durch die nun zur Verfügung stehenden drei Oberflächen kann man die Form dieser Oberflächen so anpassen, dass nicht nur die chromatische Aberration sondern auch die sphärische Aberration korrigiert wird. Im Folgenden Bild ist der Fokus eines solchen Achromaten zu sehen, der einen deutlich schärferen Focus hat als eine Einzellinse. Diese Erfindung von 1729 hat die Entwicklung von Objektiven erheblich beflügelt.



Objektive

Objektive sind Kombinationen aus mehreren Linsen mit denen erreicht werden kann, dass alle Linsenfehler gleichzeitig möglichst gut korrigiert werden. Durch Verschiebung von Linsen gegeneinander kann sogar die Brennweite des Objektivs verändert werden. Dann spricht man von einem Zoom-Objektiv. Ein Beispiel für ein Foto-Objektiv ist in der folgenden Abbildung zu sehen. Die raffinierte Kombination aus fokussierender und zerstreuer Wirkung der einzelnen Linsen, die in ihrer Kombination auch als Achromaten, wirken führt bei diesem Design zu einer flachen Bildebene bei gleichzeitiger weitgehender Korrektur aller Linsenfehler.

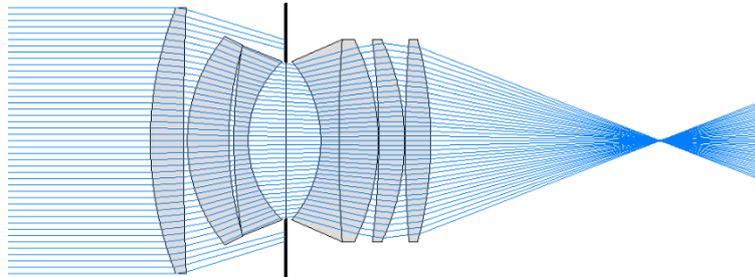
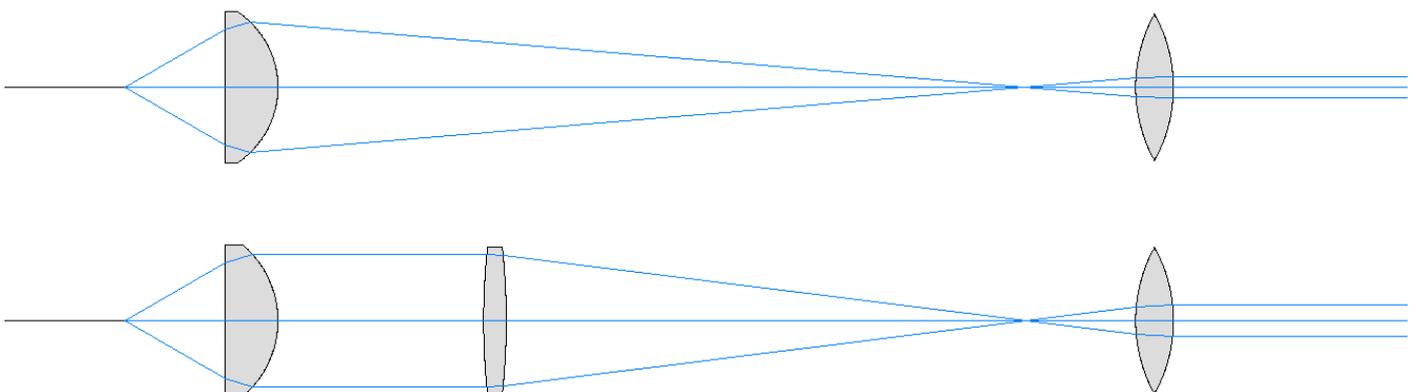


Abbildung Foto-Objektiv: Fotoobjektiv mit großer Apertur im Doppel-Gauß-Design. US-Patent 3,552,829 (Leitz 1968)

Mikroskop

Ein Mikroskop macht eine zweistufige Abbildung. Das Objektiv erzeugt ein Zwischenbild im Tubus des Mikroskops. Mit dem Okular wird dieses Zwischenbild wie mit einer Lupe nochmals zusätzlich vergrößert. Das Auge mit dem man durch das Okular schaut sieht ein virtuelles vergrößertes Bild, das auf dem Kopf steht. Die Vergrößerung berechnet sich als Produkt aus der Vergrößerung des Objektivs und des Okulars. In der folgenden Abbildung ist der Strahlengang schematisch dargestellt. Für die sehr starke Vergrößerung eines Mikroskops muss ein möglichst kurzer Abstand zwischen Gegenstand (Objekt) und der ersten Linse des Objektivs erreicht werden. Das Zwischenbild befindet sich im Tubus und ist in der Abbildung als reeller Bildpunkt auf der optischen Achse zu sehen. Mit dem Okular wird ein paralleles Strahlenbündel erzeugt. Schaut man mit dem Auge in das Mikroskop, sieht man ein virtuelles Bild in unendlich großer Entfernung, das mit entspanntem Auge betrachtet werden kann. In modernen Mikroskopen wird oft zusätzlich eine Tubuslinse verwendet, so dass das Objektiv das divergente Strahlenbündel, das vom Objekt aus geht, in ein paralleles Strahlenbündel abbildet. Die Tubuslinse fokussiert dann, um ein reelles Bild zu erzeugen.



Numerische Apertur

Ein wichtiger Parameter für ein Mikroskop ist die numerische Apertur (NA) sie ist definiert als

$$NA = n \sin \theta$$

mit dem Brechungsindex n des Mediums vor der ersten Objektivlinse. Dies kann z.B. Luft mit $n = 1$ sein oder Immersionsöl mit $n \approx 1,52$. Der Winkel θ ist der halbe Öffnungswinkel des Strahlenbündels, das in das Mikroskop-Objektiv eintritt. Die numerische Apertur ist entscheidend für das Auflösungsvermögen des Mikroskops. Durch die Welleneigenschaft des Lichtes, wird ein Objektpunkt in ein sogenanntes Beugungsscheibchen abgebildet, dessen Durchmesser von der Wellenlänge des Lichtes abhängt. Durch diese zusätzliche Unschärfe, die durch die Welleneigenschaften des Lichtes ins Spiel kommt, und nicht mit Linsenfehlern zusammenhängt, ist das Auflösungsvermögen von Mikroskopen grundsätzlich begrenzt. Die auflösbare Strukturgröße Δx die mit inkohärentem Licht der Wellenlänge λ beobachtet werden kann, ist ungefähr gleich dem halben Durchmesser des Beugungsscheibchens. Sie ist gegeben als

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 NA}$$

Je größer die numerische Apertur eines Mikroskop-Objektivs umso kleiner ist die Strukturgröße die aufgelöst werden kann. Die numerische Apertur kann auf zwei Arten vergrößert werden, erstens durch einen möglichst großen Öffnungswinkel des Eintretenden Strahlenbündels und zweitens durch den Brechungsindex des Immersionsöls. Objektive ohne Immersionsöl, also mit Luft zwischen Objekt und erster Objektivlinse haben grundsätzlich eine numerische Apertur kleiner Eins ($\sin 90^\circ = 1$). In modernen Mikroskopen werden so numerische Aperturen um 1,6 erreicht. Dazu gehören Öffnungswinkel, die nahe den theoretisch denkbaren 180° liegen und Immersionsöl mit Brechungsindex über 1,6. Bei der Entwicklung der Objektive, werden die optischen Eigenschaften des Immersionsöls und des Deckgläschens bereits berücksichtigt. Der Brechungsindex des Immersionsöls ist sehr ähnlich zu dem des Deckgläschens, so dass an den Grenzflächen zwischen Öl und Deckgläschen kaum Brechung und Reflexion auftritt. Ein Objektiv, das für den Gebrauch mit Immersionsöl konstruiert ist, hat daher bei Benutzung ohne Öl schlechte Abbildungseigenschaften und geringeres Auflösungsvermögen.

Mikroskop-Objektiv

In der folgenden Abbildung ist ein modernes Mikroskop-Objektiv dargestellt. Man sieht, dass das Licht in den einzelnen Linsen Stück für Stück gebrochen wird, um so auch die äußeren Strahlen wie auf einem Bogen durch das Objektiv zu führen und letztlich in ein paralleles Strahlenbündel abzubilden (zwischen Objektiv und dunkelgrau dargestellter Tubuslinse). Man erkennt auch, dass Objektiv und Tubuslinse aus der Kombination von mehreren Achromaten konstruiert sind.

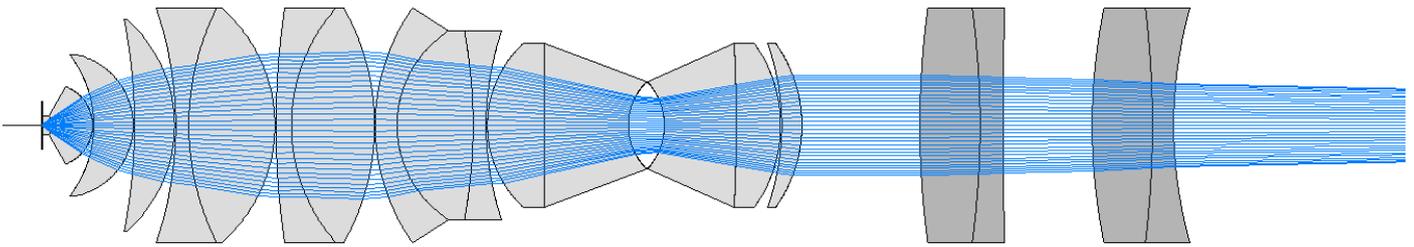


Abbildung Mikroskop-Objektiv: Modernes Mikroskop-Objektiv mit einer numerischen Apertur von $NA=1,3$ und 40-facher Vergrößerung, das für ein großes Gesichtsfeld konstruiert wurde. US-Patent 5,982,559 (Nikon 1999)

Okular

Das Okular bildet grundsätzlich – genauso wie das Objektiv – auch ein divergentes Strahlenbündel in einen parallelen Strahl ab, hat aber dennoch ganz andere Eigenschaften. Das Strahlenbündel, das von dem Zwischenbild ausgeht, hat nur eine kleine Divergenz. Die Bildpunkte des Zwischenbildes liegen aber weit von der optischen Achse entfernt. Weiterhin ist entscheidend, dass die parallelen Strahlenbündel, die das Okular verlassen, alle durch die Pupille des Auges fallen. In der unteren Abbildung ist der Strahlengang für zwei Bildpunkte des Zwischenbildes gezeigt. Die Blende auf der rechten Seite stellt die Pupille des Auges dar. Wenn die Strahlen von Bildpunkten die weit von der optischen Achse entfernt sind durch die Pupille fallen, dann hat man im Mikroskop ein großes Gesichtsfeld. Der Abstand zwischen Pupille und Okular wird bei der Konstruktion des Okulars auf einen bestimmten Abstand festgelegt. In dem Beispiel unten sind es 19,3 mm. Man erreicht mit dem hier dargestellten Okular ein Gesichtsfeld von $\pm 21^\circ$. Wenn man durch ein Mikroskop schaut und das Auge nicht den richtigen Abstand zum Okular hat, dann fällt einem auf, dass das Gesichtsfeld durch schwarze Bereiche verkleinert wird. In diesem Fall treffen nicht mehr alle parallele Strahlenbündel in das Auge und die eigene Pupille schränkt das Gesichtsfeld ein.

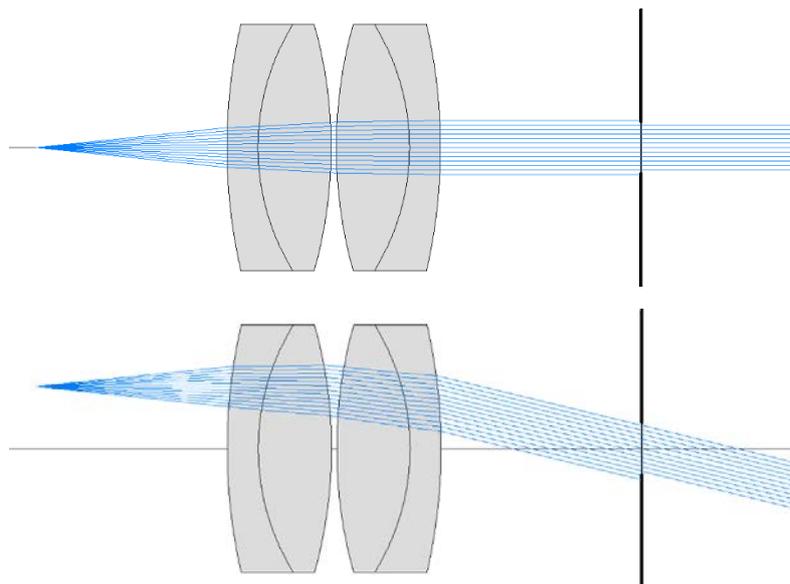


Abbildung Okular: Okular vom Plössl-Typ mit zwei Achromaten (grau), Brennweite 25mm und 10-fache Vergrößerung. Rechts im Bild ist die Pupille des Auges als Blende dargestellt. Oberes Bild: Strahlengang für einen Bildpunkt des Zwischenbildes links, der auf der optischen Achse liegt. Unteres Bild: der Bildpunkt des Zwischenbildes liegt 6mm oberhalb der optischen Achse. Das parallele Strahlenbündel fällt auch durch die Pupille des Auges, wenn sie sich im richtigen Abstand vom Okular befindet.

Strahlengang im kompletten Mikroskop

In den folgenden Abbildungen sehen wir nun den Strahlengang in dem kompletten Mikroskop, das zusammengesetzt ist aus dem Objektiv mit $NA = 1,3$, der Tubuslinse dem Okular und der Pupille des Auges. In Abbildung (b) ist ein Objekt, 100 Mikrometer oberhalb der optischen Achse, direkt unterhalb dem Deckgläschen dargestellt, von dem ein divergentes Strahlenbündel ausgeht, das durch das Deckgläschen und das Immersionsöl direkt in die erste Objektivlinse eintritt. Das Objektiv hat eine 40-fache Vergrößerung. In Abbildung (c) ist der Bildpunkt in der Zwischenbildebene sichtbar, der 4 mm unterhalb der optischen Achse liegt. Das Okular mit 10-fache Vergrößerung bildet diesen Bildpunkt in ein paralleles Strahlenbündel ab, das durch die Pupille des Auges trifft. Im Bild sind die Strahlen des parallelen Strahlenbündels nach links verlängert (schwarz). Sie verlaufen in die Richtung in der das virtuelle Bild des Objektes beobachtet wird. Es ist gut sichtbar, dass bei diesem hochwertigen Mikroskop ein perfekt paralleles Strahlenbündel entsteht.

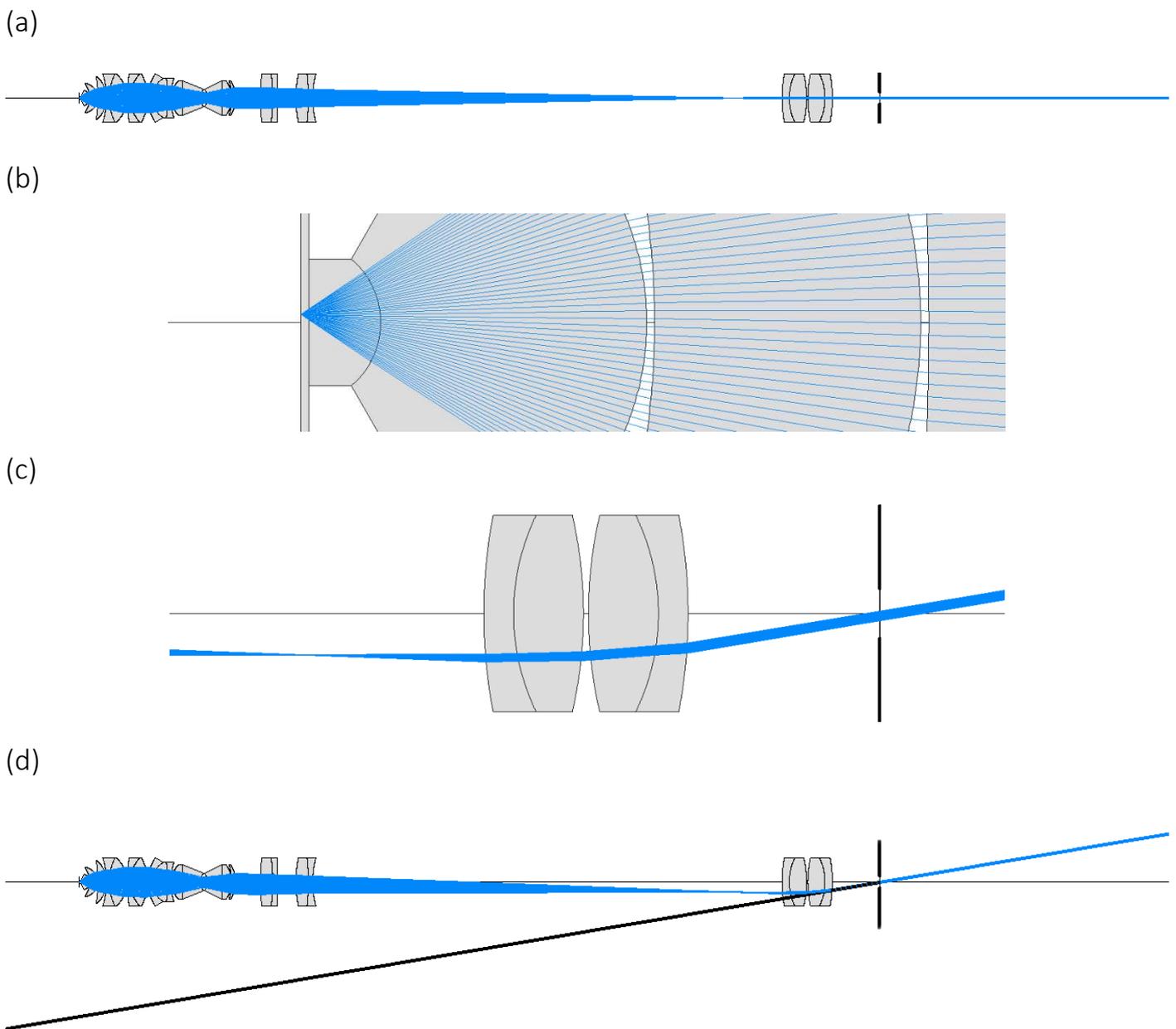


Abbildung komplettes Mikroskop mit 400-facher Vergrößerung: Modernes Mikroskop-Objektiv mit einer numerischen Apertur von $NA=1,3$ und 40-facher Vergrößerung und großem Gesichtsfeld. US-Patent 5,982,559 (Nikon 1999). Okular vom Plössl-Typ mit zwei Achromaten (25mm Brennweite, 10-fache Vergrößerung). Pupille des Auges als Blende dargestellt. Das parallele Strahlenbündel, das ins Auge fällt, wurde nach links mit schwarzen Linien verlängert, die in die Richtung des virtuellen Bildes verlaufen.

Im Folgenden Bild ist der Strahlengang in einem Mikroskop mit Nagler-Typ Okular gezeigt. Dieses Okular hat bei einer Brennweite von 10mm und 25-facher Vergrößerung ein ultra-weites Gesichtsfeld von $\pm 45^\circ$. Es ist eine komplizierte Anordnung von Linsen erforderlich, um achsferne Bildpunkte unter großen Winkeln zur optischen Achse noch fehlerfrei abzubilden.

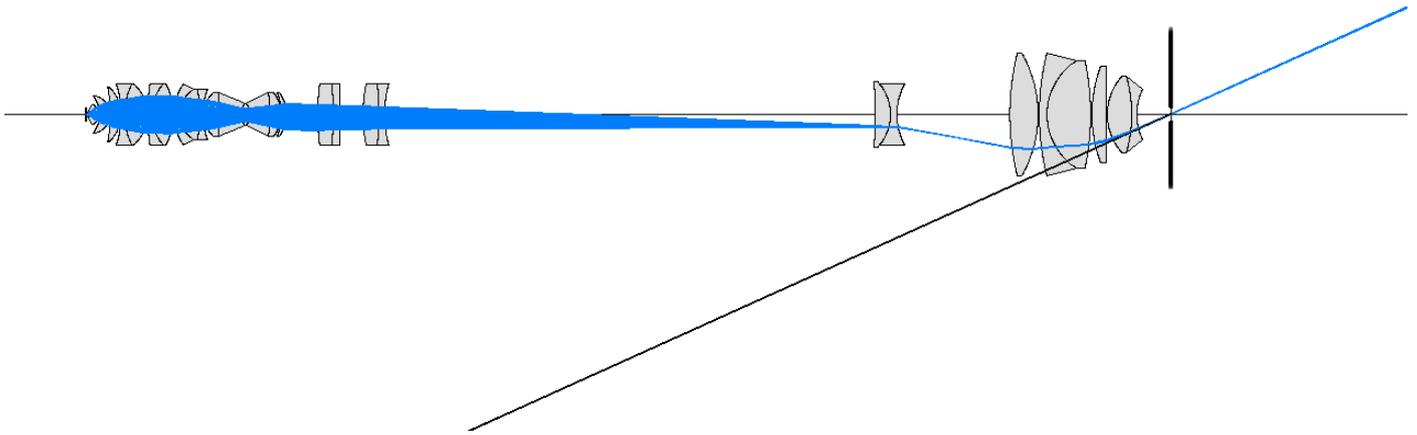


Abbildung komplettes Mikroskop mit 1000-facher Vergrößerung: Modernes Mikroskop-Objektiv wie in vorangegangener Abbildung kombiniert mit einem Nagler-Typ Okular, das ein besonders großes Gesichtsfeld von $\pm 45^\circ$ eröffnet (10mm Brennweite, 25-fache Vergrößerung, US-Patent 4,747,675 A. Nagler, 1987). Die gezeigten Strahlen gehen von einem Objektpunkt $100\mu\text{m}$ oberhalb der optischen Achse aus.

FRAGEN

- ...