

OK Einführung - optische Komponenten

Linsen

Die Wirkung von Linsen beruht auf der Brechung des Lichts an ihren Grenzflächen. Optische Linsen sind lichtdurchlässige, von zwei gewölbten Flächen begrenzte Körper. Sie bestehen im Allgemeinen aus Glas oder Kunststoff und sind meist durch Kugelflächenausschnitte begrenzt (siehe Abbildung OK.1). Die optische Achse verbindet die Mittelpunkte M der beiden Kugeln und schneidet die Linsenachse im rechten Winkel. Im folgenden werden nur sogenannte *dünne Linsen* betrachtet, d.h. Linsen bei denen der Radius r groß gegenüber der Dicke der Linse ist.

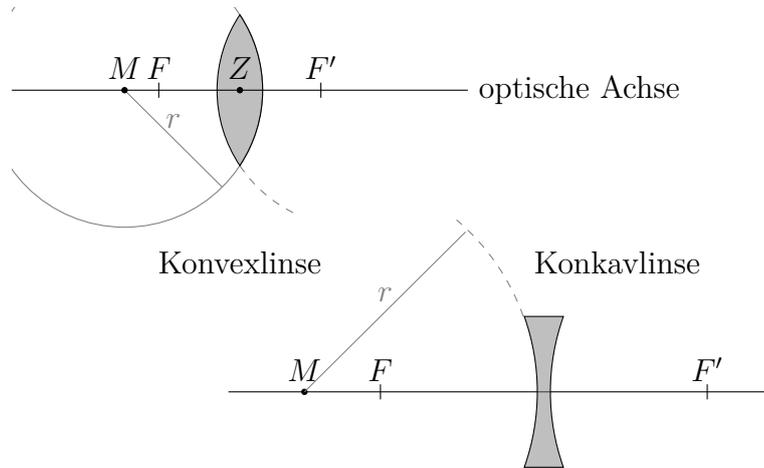


Abbildung OK.1: Konvex- und Konkavlinse.

Konvexlinsen Bei Konvexlinsen (auch Sammellinsen genannt) ist die Mitte dicker als der Rand. Sie fokussieren ein zur optischen Achse parallel einfallendes Lichtbündel in den auf der anderen Seite der Linse liegenden Punkt F auf der optischen Achse (siehe *Bildkonstruktion an Linsen*). Der Punkt F und sein Spiegelpunkt F' bezüglich der Linsenachse werden Brennpunkte genannt. Der Abstand eines Brennpunktes zur Linsenachse, in Abbildung OK.2 die Strecke \overline{FZ} , wird als Brennweite f bezeichnet.

Konkavlinzen Bei Konkavlinzen ist die Mitte dünner als der Rand. Durch Konkavlinzen werden achsenparallel einfallende Strahlen zerstreut. Dies wird in Abbildung OK.3 gezeigt. Daher nennt man diese Linsen auch Zerstreuungslinsen.

Brechkraft (Brechwert) Mithilfe der Brennweite f lässt sich ein Maß dafür definieren, wie stark Lichtstrahlen durch eine Linse (i.A. optische Struktur) gebrochen werden. Sie hat die Einheit Dioptrien:

$$\text{Brechkraft } D = \frac{1}{f} \quad [D] = 1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1} \quad (\text{OK.1})$$

Bildkonstruktion an Linsen

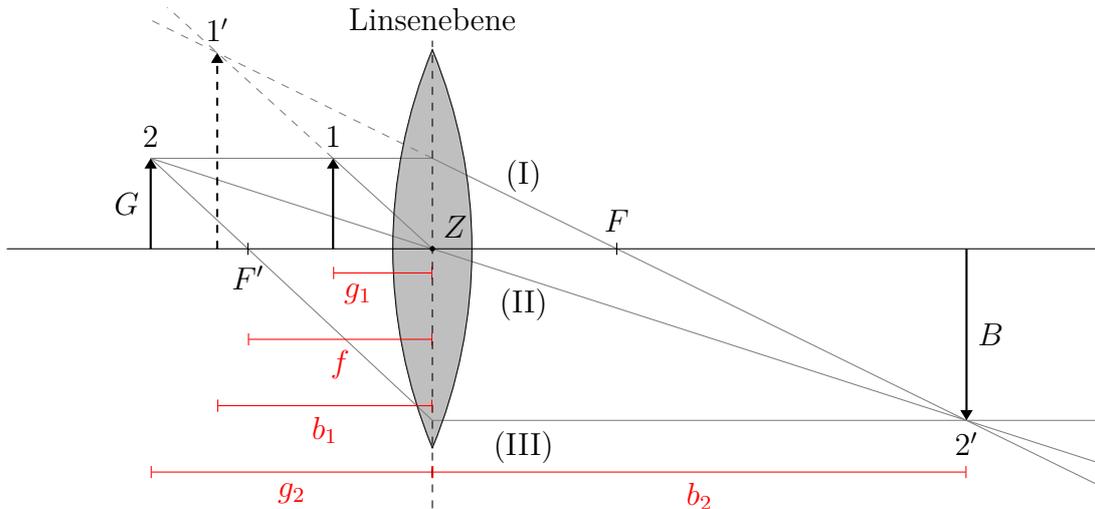


Abbildung OK.2: Bildkonstruktion an einer dünnen Sammellinse: G und B bezeichnen die Gegenstands- bzw. Bildgröße. Es wird für zwei Fälle gezeigt, wie die Abbildung der Spitze des Gegenstandes (bezeichnet mit 1 bzw. 2) konstruiert wird.

Konvexlinse: Ein Gegenstand G in der Entfernung g von der Linsenebene (Mittalebene der Linse) wird durch eine Konvexlinse in ein Bild B in der Entfernung b von der Linsenebene abgebildet (siehe Abbildung OK.2). Bei dünnen Linsen lässt sich die zweimalige Brechung des Lichtes (Eintritt in bzw. Austritt aus der Linse) durch eine einzige Brechung an der Linsenebene ersetzt denken. Zur Konstruktion wählt man Strahlen, deren Brechung nach Definition der Sammellinse bekannt ist.

- (A) Ein achsenparalleler Strahl durch G trifft senkrecht auf die Linsenebene und geht nach der Brechung durch F .
- (B) Ein Mittelpunktstrahl verläuft ungebrochen von G durch Z nach B .
- (C) Ein Strahl von G durch F' (Brennstrahl) wird nach der Brechung zu einem achsenparallelen Strahl.

Die drei Strahlen schneiden sich im Bild B und somit wird der Punkt 2 in Abbildung OK.2 in $2'$ abgebildet. Bei einer scharfen Abbildung werden alle Strahlen, die vom Gegenstandspunkt 2 durch die Linse treten, im Bildpunkt $2'$ gebündelt. Wenn sich die Strahlen so wie in diesem Fall wirklich schneiden, heißt das Bild B *reell* (Bsp. Projektor).

Falls die Gegenstandsweite g kleiner ist als die Brennweite f , so schneiden sich nur die rückwärtigen Verlängerungen der Strahlen, d.h. der Punkt 1 in Abbildung OK.2 wird in $1'$ auf der gleichen Seite überführt. In diesem Falle heißt das Bild *virtuell* (Bsp. Lupe).

Aus der Abbildung OK.2 erhält man (durch Vergleich ähnlicher Dreiecke)
die Abbildungsgleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}. \quad (\text{OK.2})$$

Bei virtuellen Bildern ist b negativ. Für das Verhältnis Bildgröße zu Gegenstandsgröße, d.h. für die lineare Vergrößerung, gilt:

$$\frac{B}{G} = \frac{\text{Bildweite } b}{\text{Gegenstandsweite } g}. \quad (\text{OK.3})$$

Konkavlinse: Bei Zerstreuungslinsen werden parallel zur optischen Achse einfallende Strahlen so gebrochen, als kämen sie von einem Brennpunkt F' , der auf derselben Seite der Linse wie die ankommenden Lichtstrahlen liegt (siehe Abbildung OK.3). Zerstreuungslinsen haben also virtuelle oder scheinbare Brennpunkte. In diesem Fall sind f und b kleiner Null.

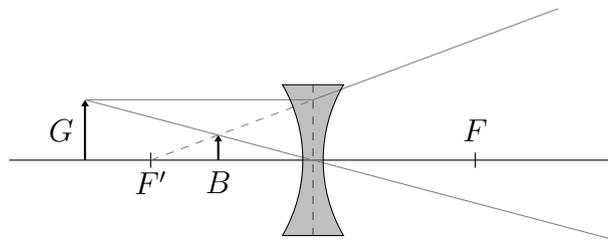


Abbildung OK.3: Bildkonstruktion an einer Konkavlinse: Achsenparallel einfallende Strahlen werden so gebrochen als kämen sie von einem virtuellen Brennpunkt F' .

Linsensysteme: Soll die Brennweite f_{ges} eines Systems mehrerer Linsen bestimmt werden, so kann man bei dünnen Linsen die Kehrwerte der Brennweiten aller Linsen addieren, um den Kehrwert der Gesamtbrennweite zu erhalten:

$$\frac{1}{f_{\text{ges}}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots \quad (\text{OK.4})$$

**Das
 menschliche
 Auge**

Die Bildweite b ist durch die Abmessung des Augenkörpers vorgegeben und die Gegenstandsweite g liegt durch die Entfernung des Gegenstands von der Augenlinse fest. Um ein scharfes Bild des Gegenstands auf der Retina zu erhalten, wird die Brennweite f der Augenlinse so verändert, dass die obige Abbildungsgleichung (Gleichung OK.2) erfüllt ist. Diesen Vorgang nennt man Akkommodation und er erfolgt durch die Veränderung der Linsenkrümmung durch die Ciliarmuskeln (siehe Abbildung OK.4).

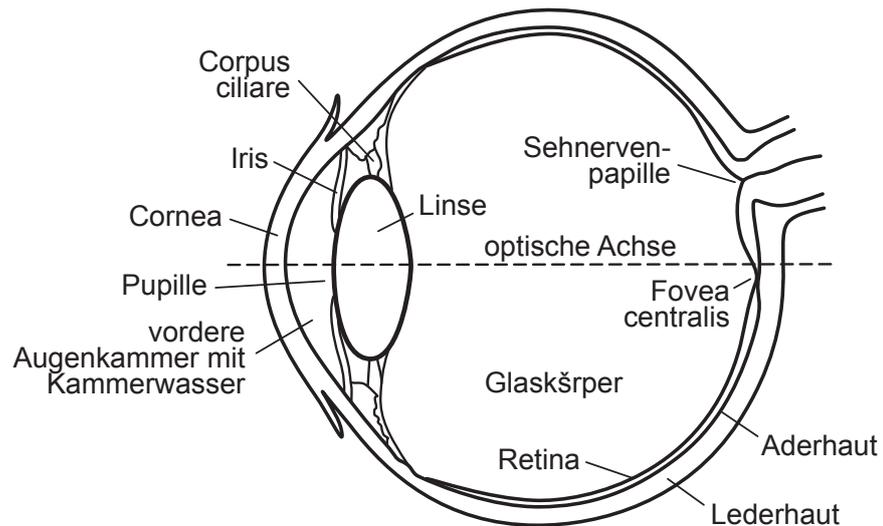


Abbildung OK.4: Schnitt durch ein menschliches Auge.

Wird der zu betrachtende Gegenstand näher an das Auge herangeführt, so wird auch sein Bild auf der Retina größer. Die minimale, noch zu einer scharfen Abbildung führende Entfernung vom Auge beträgt etwa 5 cm und nimmt mit zunehmendem Alter zu. Für noch kleinere Entfernungen reicht das Krümmungsvermögen der Augenlinse nicht mehr zur Erzeugung eines scharfen Bilds auf der Retina aus. Die Betrachtung von Gegenständen in derart kleinen Entfernungen ist allerdings sehr anstrengend; ermüdungsfrei können von den meisten Augen Gegenstände in einer Entfernung von etwa 25 cm betrachtet werden. Diese Entfernung bezeichnet man als „deutliche Sehweite“ s_0 .

Die Vergrößerung eines optischen Instruments wäre eigentlich das Verhältnis der Größe des Gegenstandsbilds auf der Retina unter Verwendung des Instruments zur Größe des Gegenstandsbilds auf der Retina, wenn sich der Gegenstand ohne Instrument in der Entfernung s_0 befände. Da die Größenbestimmung von Bildern auf der Retina praktisch nicht möglich ist, definiert man die Vergrößerung über die Sehwinkel, d. h. der Winkel, den die Randstrahlen des Gegenstands, die durch

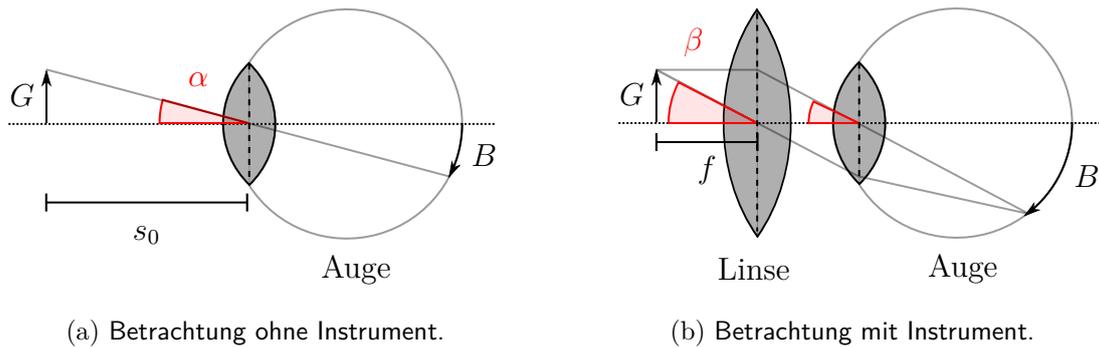


Abbildung OK.5: **(a)** Strahlenverlauf durch das Auge: Ein Gegenstand der Größe G in der Entfernung s_0 wird unter einem Sehwinkel von α betrachtet. **(b)** Betrachtung eines Gegenstands G mit Lupe unter dem Sehwinkel β : Der Gegenstand befindet sich in der Brennweite f der Sammellinse. In dem Fall erhält man die maximale Vergrößerung.

den Linsenmittelpunkt gehen, einschließen (siehe Abbildung OK.5). Da diese Mittelpunktstrahlen nicht gebrochen werden, sind die Sehwinkel stets proportional zur Bildgröße B auf der Retina. Die Vergrößerung v ist dann

$$v = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}, \quad \text{d. h. für kleine Winkel: } v \approx \frac{\beta}{\alpha}. \quad (\text{OK.5})$$

Hierbei ist β der Sehwinkel des Gegenstandes mit Instrument (Abbildung OK.5b oder Abbildung OK.7) und α der Sehwinkel unter dem der Gegenstand in der deutlichen Sehweite s_0 dem Auge ohne Instrument erscheinen würde (Abbildung OK.5a).

Um feine Strukturen eines Gegenstands noch erkennbar machen zu können, muss sein Bild größer als die Größe einzelner Sehzellen sein. Die Grenze für die Erkennung von Strukturen ist damit durch die Packungsdichte der Zapfen gegeben, die im „Gelben Fleck“ (Fovea centralis, siehe Abbildung OK.4) am größten ist. Zwei Gegenstandspunkte können dann noch getrennt wahrgenommen werden, wenn die von ihnen gezogenen Mittelpunktstrahlen einen Winkel von wenigstens einer Bogenminute $1' = 1^\circ/60$ einschließen.

Lupe

Eine Lupe ist eine Sammellinse, die derart zwischen Auge und Gegenstand gehalten wird, dass der Gegenstand innerhalb der Brennweite f dieser Sammellinse liegt. Maximale Vergrößerung erreicht man, wenn der Gegenstand in Brennweite f zur Lupe steht (Abbildung OK.5b). Lichtstrahlen, die aus einem Punkt des Gegenstandes kommen, verlaufen in diesem Fall hinter der Linse als paralleler Lichtstrahl. Das Bild lässt sich so mit dem Auge entspannt betrachten. Für die Lupen-

vergrößerung ergibt sich für diesen Grenzfall folgende geometrische Beziehung

$$v_{\text{Lupe}} = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} = \frac{G/f}{G/s_0} = \frac{s_0}{f}. \quad (\text{OK.6})$$

Mikroskop

Genügt die mit einer Lupe erreichbare Vergrößerung nicht, so wird ein Mikroskop benutzt. Das Mikroskop besteht im Prinzip aus zwei Sammellinsen, einer Projektionslinse (Objektiv) und einer Lupe (Okular). Das Objekt G befindet sich zwischen einfacher und doppelter Brennweite f_{Ob} des Objektivs, so dass an einer festliegenden Stelle im Tubus des Mikroskops ein reelles, umgekehrtes, vergrößertes Zwischenbild B_z des Objekts entsteht (siehe Abbildung OK.6). Das Zwischenbild wird mit der zweiten Sammellinse (Okular), die als Lupe dient, betrachtet. Maximale Vergrößerung für das Okular erreicht man, wenn das Zwischenbild B_z im Abstand der Brennweite des Okulars f_{Ok} liegt. Das Bild B wird scharf gestellt, indem durch Heben oder Senken des Tubus die Gegenstandsweite g_{Ob} zwischen Objekt und Objektiv verändert wird. Die Bildweite des Zwischenbildes ist dabei durch das Objektiv bzw. die Tubuslänge t (Abstand F'_{Ob} zu F_{Ok}) fest vorgegeben. Die Gesamtvergrößerung des Mikroskops ist das Produkt von Objektiv- und Okularvergrößerung (beide Angaben sind auf den jeweiligen Objektiv- und Okularfassungen eingraviert).

$$v_{\text{ges}} = v_{\text{Objektiv}} \cdot v_{\text{Okular}}. \quad (\text{OK.7})$$

In der Praxis werden Objektive mit Vergrößerungen von 1 (Übersichtsbetrachtungen des Präparats) bis 100 und Okulare mit 5- bis 25-facher Vergrößerung eingesetzt.

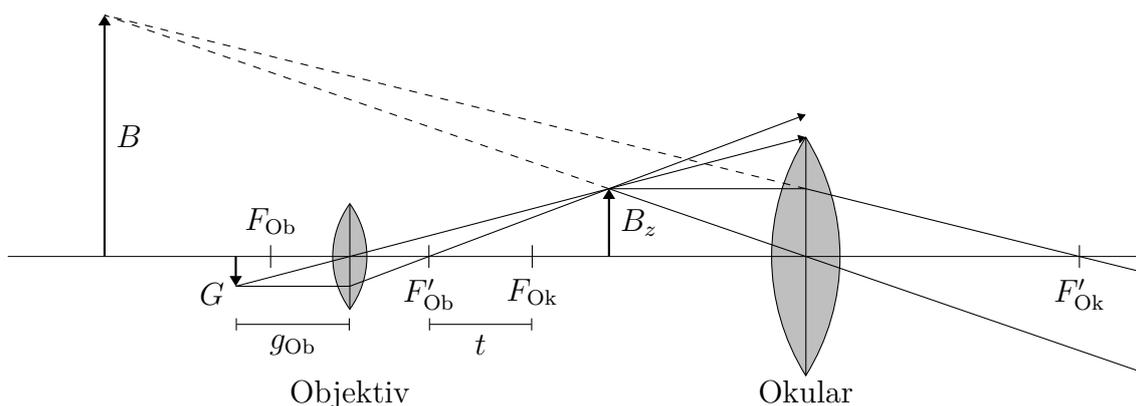


Abbildung OK.6: Schematischer Strahlenverlauf in einem Lichtmikroskop.

Fernrohr

Linsenfernrohre bestehen im einfachsten Falle aus zwei Linsen, dem Objektiv und dem Okular. Im Falle von *astronomischen Fernrohren*

(Teleskop) sind Objektiv und Okular Sammellinsen. Sie werden zur Vergrößerung des Seh winkels eines weit entfernten Gegenstands verwendet. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass das vom Gegenstand ausgehende Licht nahezu parallel auf das Fernrohrobjektiv trifft (siehe Abbildung OK.7). Zur Betrachtung ferner Gegenstände lässt man beim Fernrohr den Brennpunkt F_{Ob} des Objektivs mit dem Brennpunkt F'_{Ok} des Okulars zusammenfallen, so dass parallel ins Objektiv fallende Lichtbündel das Fernrohr auch wieder parallel verlassen.

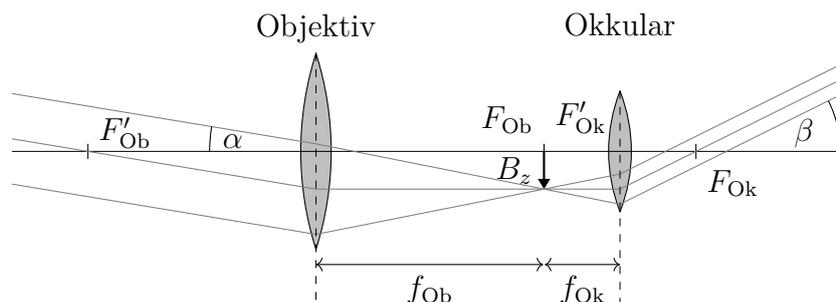


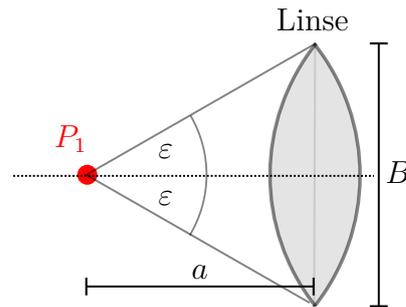
Abbildung OK.7: Schematischer Strahlengang durch ein Fernrohr: Parallel einfallende Strahlen verlassen das Fernrohr parallel. Der Gegenstand erscheint auf der rechten Seite unter dem vergrößerten Seh Winkel β .

Auflösungsvermögen des Objektivs

Maßgebend für die Leistungsfähigkeit eines Mikroskops ist nicht die erreichbare Vergrößerung, sondern sein *Auflösungsvermögen*, das angibt, bei welchem minimalen Abstand s_{min} zwei Objektpunkte noch getrennt wahrnehmbar sind. Die Begrenzung der Wellenfront durch optische Komponenten wie z.B. Blenden, Linsen führt durch das physikalische Phänomen der Beugung zu einer Begrenzung des Auflösungsvermögens. Die Beugung kann durch das Huygenssche Prinzip erklärt werden. (siehe „**Einführung in die Optik**“). Bei der Abbildung eines (Gegenstands-) Punktes durch eine Sammellinse ergibt sich aus diesem Grund kein geometrisch-optisch erwarteter scharfer Punkt in der Bildebene der Linse, sondern an der endlichen Linsenöffnung ein Beugungsdiagramm wie in Abbildung OK.8 mit einem Hauptmaximum ("Beugungsscheibchen"), dessen Durchmesser nach

$$\sin \alpha = \frac{\lambda_0}{B} \quad (\text{OK.8})$$

von der Öffnung B (Durchmesser der Linse) und der Wellenlänge λ_0 des Lichtes abhängt. Je kleiner die Linse und je größer die Wellenlänge sind, desto größer erscheint das Beugungsscheibchen und desto unschärfer wird die Abbildung (und umgekehrt).



$$\tan \varepsilon = \frac{B/2}{a} \quad (\text{OK.10})$$

$$\Rightarrow B = 2 a \tan \varepsilon. \quad (\text{OK.11})$$

Kombiniert man Gleichung OK.9 und Gleichung OK.11, erhält man als kleinsten, auflösbaren Punkt Abstand s_{\min} einer Linse

$$s_{\min} = \frac{1}{2} \frac{\lambda_0}{\tan \varepsilon}. \quad (\text{OK.12})$$

Mit der Näherung für kleine ε wird aus Gleichung OK.12

$$s_{\min} = \frac{1}{2} \frac{\lambda_0}{\sin \varepsilon}. \quad (\text{OK.13})$$

Zusammenfassend sei angemerkt, dass den Betrachtungen zum Auflösungsvermögen insgesamt Näherungen zugrunde liegen, so dass die abgeleiteten Ergebnisse den Charakter einer Abschätzung haben.

Beugungsgitter

Ein Beugungsgitter ist eine regelmäßige Anordnung von sehr vielen, einander parallelen, feinen Spaltöffnungen, also gewissermaßen eine periodische Fortsetzung der Doppelspaltstruktur (siehe „**Einführung in die Optik**“). Der Abstand äquivalenter Punkte des Gitters, z.B. von Spaltmitte zu Spaltmitte, wird als Gitterkonstante bezeichnet.

Treffen parallele Lichtstrahlen fester Phase und gleicher Wellenlänge λ auf das Gitter, so wird (wie beim Doppelspalt) jeder dieser Spalte zum Ausgangspunkt einer Elementarwelle. Werden die gebeugten Strahlen auf einem Schirm hinter dem Gitter abgebildet, so erscheint dort eine Interferenz-Figur. Ähnlich wie die Doppelspalt-Interferenz-Figur enthält sie eine Folge äquidistanter Interferenzmaxima 0-ter, $\pm 1.$, $\pm 2.$, ..., N -ter Ordnung (Abbildung OK.9). Allerdings sind die Maxima der Gitter-Interferenz wesentlich schmaler, was eine Folge der großen Anzahl der Spaltöffnungen im Gitter ist. Statt mit einer Zweifach-Interferenz wie beim Doppelspalt hat man es nämlich mit einer Vielfach-Interferenz zu tun. Wenn d die Gitterkonstante ist, so ergibt sich für die Interferenzmaxima N -ter Ordnung ebenso wie beim Doppelspalt

$$\sin \alpha = \frac{N \cdot \lambda}{d}. \quad (\text{OK.14})$$

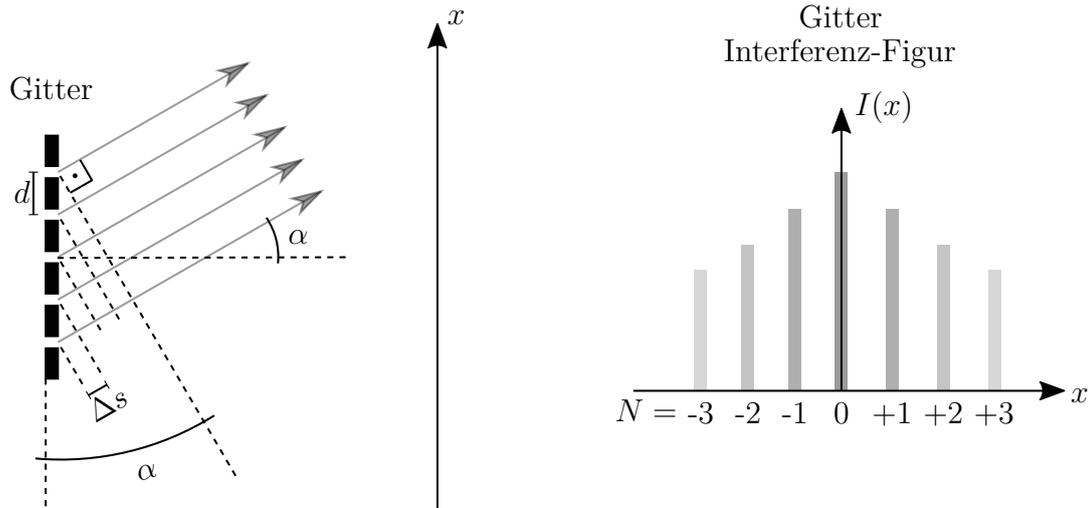


Abbildung OK.9: LINKS: Beugung am Gitter. RECHTS: Schematische Darstellung der Intensitätsverteilung der Interferenz-Figur eines Gitters.

**Gitter- und
Prismen-
spektrometer**

Das Gitter- und Prismenspektrometer ist zur Messung von Lichtwellenlängen im sichtbaren Bereich geeignet. Der prinzipielle Aufbau ist in der Abbildung OK.10a bzw. Abbildung OK.10b dargestellt.

Die von der Lichtquelle LQ beleuchtete Spaltblende befindet sich in der Brennebene der ersten Linse. Das aus dem Spalt austretende zu untersuchende Licht verlässt die Linse also als Parallelstrahlbündel. Es durchläuft das dispersive Element (Prisma oder Gitter) und wird durch die zweite Linse auf den Schirm, der in der Brennebene der zweiten Linse platziert ist, wieder fokussiert. Dadurch werden auf dem Schirm Bilder des Spalts beobachtet (schmale Striche).

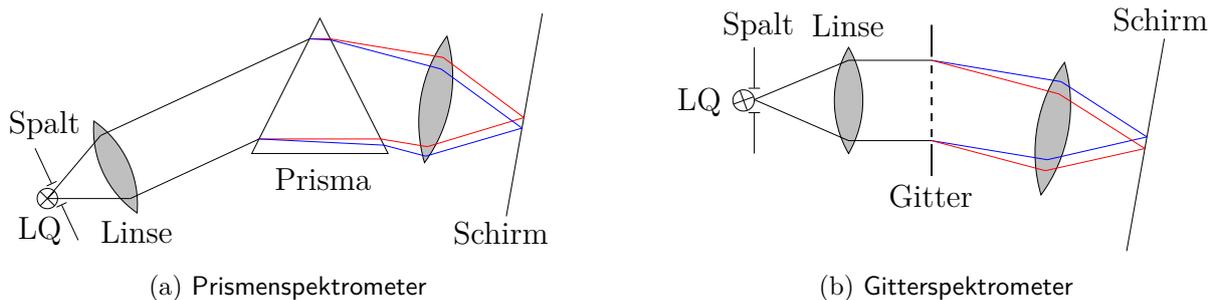


Abbildung OK.10: Prinzipaufbau eines (a) Prismen- bzw. (b) eines Gitterspektrometers.

Da man die Dispersion des Prismenglases, d. h. seine wellenlängenabhängige Brechzahl $n(\lambda)$, nicht kennt, muss man das Gerät mit Licht bekannter Wellenlänge kalibrieren. Eine absolute Messung von Wellenlängen ist mit einem Gitterspektrometer (siehe Abbildung OK.10b)

möglich.

Mit einer solchen Anordnung kann man die Wellenlängen von Licht im sichtbaren Bereich ($400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$) messen, da der Brechungsindex n des Prismenglases von der Wellenlänge λ des Lichts abhängt: $n = n(\lambda)$ (Dispersion). Emittiert die Quelle Licht mehrerer Wellenlängen, so wird das einfallende Lichtbündel durch unterschiedliche Brechungen an den Prismenflächen in Teilbündel zerlegt. Die Lage der farbigen Linien-Spaltbilder auf dem Schirm ist dann den Wellenlängen der Teilbündel eindeutig zugeordnet. Diese Eindeutigkeit rührt daher, dass im sichtbaren Bereich des Lichts der Brechungsindex monoton mit abnehmender Wellenlänge ansteigt. So wird beispielsweise in der Abbildung OK.10a das blaue Lichtbündel stärker gebrochen als das rote Lichtbündel. Bei dem Gitterspektrometer ist es anders herum.