

Zusammenfassung Physik 3

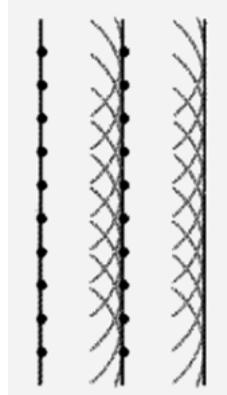
Licht

Die Energie E eines Photons hängt mit der Frequenz der Lichtwelle zusammen über die Einstein'sche Beziehung $E = \hbar * \omega$ zusammen, \hbar ist das Planck'sche Wirkungsquantum.

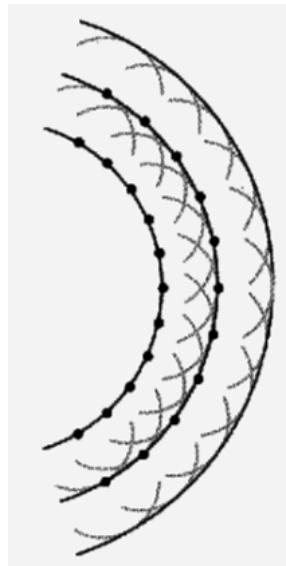
$$c = 3 * 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

Ausbreitung des Lichtes, Huygens'sches Prinzip

Jeder Punkt einer bestehenden Wellenfront ist Ausgangspunkt einer neuen kugelförmigen Elementarwelle, die die gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz wie die ursprüngliche Wellenfront hat. Die Einhüllende aller Elementarwellen ergibt die Wellenfront zu einem späteren Zeitpunkt.

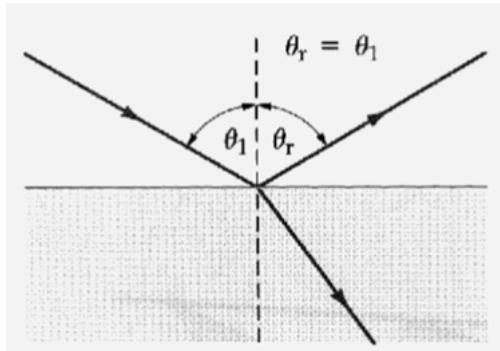


Die Huygens'sche Konstruktion für die Ausbreitung einer ebenen Welle nach rechts.



Die Huygens'sche Konstruktion für die Ausbreitung einer kugelförmigen Welle nach rechts.

Reflexion und Brechung



Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel

Reflexionsgesetz (Gültig für alle Wellenarten)

Treffen Wellen auf ein Hindernis, entstehen neue Wellen. Ein Teil der Energie wird zurückgeworfen, ein Teil durchgelassen. Wird die Welle von einer ebenen Fläche zurückgeworfen, so spricht man von einer regulären Reflexion oder Spiegelung, bei rauen Oberflächen von diffuser Reflexion oder Streuung. In jedem Fall ist der Winkel zwischen einfallenden Strahl (Einfallswinkel) und der Grenzflächennormale (Lot) gleich groß wie der Winkel zwischen reflektiertem Strahl (Ausfallwinkel) und dem Lot. Einfallwinkel und Lot bilden eine Ebene (Einfallsebene) in der auch der reflektierte Strahl liegt.

In der Abbildung wird ein Teil der Welle transmittiert, wobei sich die Ausbreitungsrichtung des Strahles nach Eintritt ins zweite Medium ändert. Diese Richtungsänderung wird Brechung genannt. Der Effekt der Brechung lässt sich im Wesentlichen damit erklären, dass Licht in jedem Medium eine andere Ausbreitungsgeschwindigkeit hat.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Lichtstrahles in einem beliebigen Medium wird durch das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und derjenigen im Medium durch seine Brechzahl n charakterisiert.

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

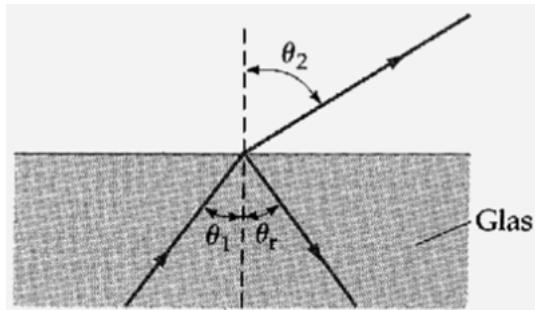
Zum Beispiel ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Glas etwa $\frac{2}{3}$ der von Vakuum.

$$n = \frac{c}{c_m} = \frac{3}{2}$$

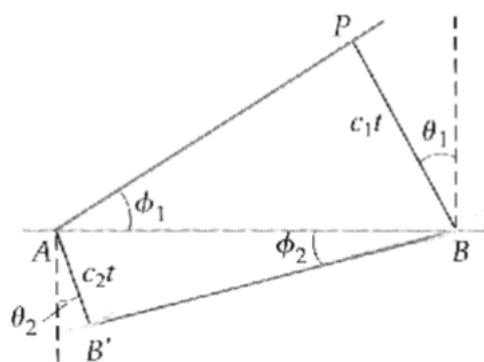
Hat eine Substanz eine höhere Brechzahl als eine andere, so nennt man sie optisch dichter, andernfalls optisch dünner.

Die Frequenz der Welle bleibt beim Durchgang erhalten. Somit muss sich die Wellenlänge ändern! Für eine Welle mit der Länge λ und der Frequenz ω im Vakuum gilt in einem

$$\text{Medium } \lambda_m = \frac{c_m}{\omega} = \frac{\frac{c}{n}}{\omega} = \frac{\lambda}{n}$$



Brechung eines Lichtstrahles von einem optisch dichten in ein optisch dünneres Medium. Der Brechungswinkel ist größer als der Einfallswinkel. Der austretende Lichtstrahl wird von der Normalen weg gebrochen.

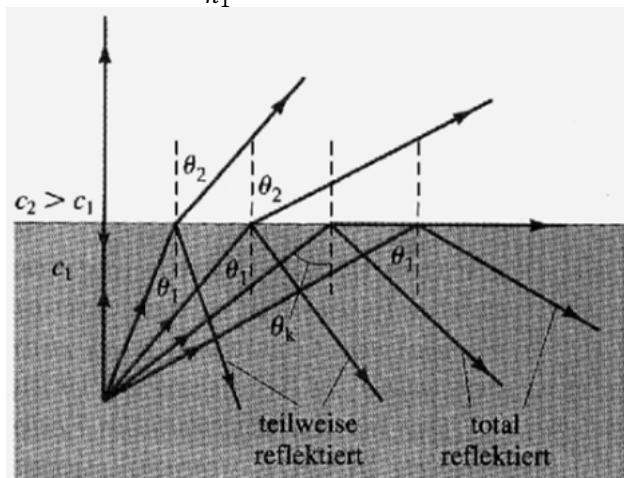


Trifft die Wellenfront AP im Winkel θ_1 auf die Glasoberfläche. Da jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer neuen Welle ist, betrachtet man die Punkte A und P . Von P ausgehend erreicht die neue Elementarwelle den Punkt B in der Zeit t , in der die Elementarwelle des Punktes A gerade bis B' gekommen ist. Die neue Wellenfront BB' verläuft nun nicht mehr parallel zur eintretenden Wellenfront AP .

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2)$$

Wie das Reflexionsgesetz, gilt dieses Gesetz von Snellius ebenfalls für alle Arten von Wellen.

Für jeden Winkel größer als θ_k tritt keine Brechung mehr auf. Die Strahlen werden in das dichtere Medium zurückreflektiert. Man nennt das Totalreflexion. Die nur beim Übergang vom optisch dichten zum optisch dünneren Medium auftritt. Für den kritischen Winkel gilt: $\sin(\theta_k) = \frac{n_2}{n_1}$



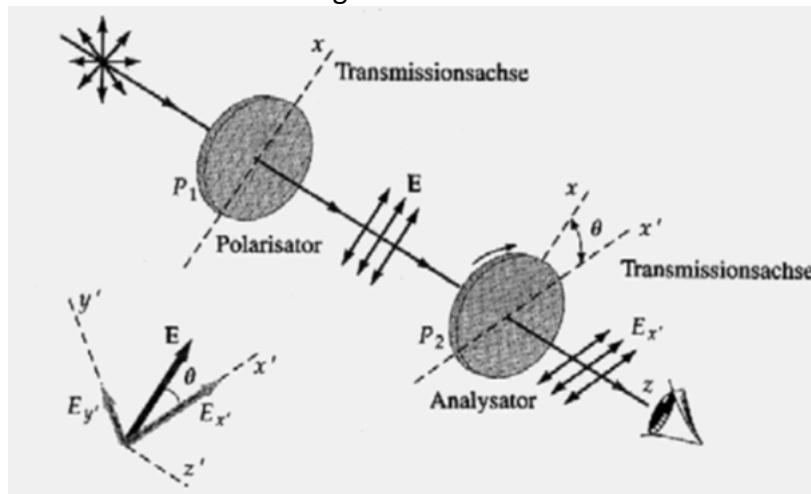
Polarisation

Gewöhnlich sind Wellen, die von einer einzigen Quelle erzeugt werden, polarisiert, was nichts anderes bedeutet, als dass ihre Auslenkungen nur eine Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung annehmen.

Unpolarisiertes Licht kann durch Absorption, Streuung, Reflexion und Doppelbrechung polarisiert werden.

Polarisation durch Absorption

Fällt Licht auf eine solche Folie, werden elektrische Ströme in den Ketten induziert und ein Teil der Lichtenergie absorbiert. Nur das E-Feld senkrecht zu den Ketten wird durchgelassen, man nennt diese Richtung daher Transmissionsachse.



Das Licht, das aus der ersten Folie austritt, ist bereits linear polarisiert. Entsprechend heißt diese Folie Polarisor. Die zweite Folie dient zur Feststellung der Schwingungsrichtung, ist daher ein Analysator. Stehen die Transmissionsachsen senkrecht aufeinander, erreicht man eine vollständige Auslöschung des Lichtes.

Allgemein gilt für die von der zweiten Folie durchgelassenen Lichtintensität:

$$I = I_0 * \cos^2(\theta) \quad (\text{Gesetz von Malus})$$

Polarisation durch Streuung

Wird Licht im Medium zuerst absorbiert und dann wieder abgestrahlt, bezeichnet man es als gestreut.

Auch die blaue Farbe des Himmels beruht auf Streueffekten des Sonnenlichtes an den Luftmolekülen. Weil kurzwelliges Licht stärker gestreut wird als langwelliges, herrscht im gestreuten Licht die blaue Farbe vor.

Polarisation durch Reflexion

Abhängig vom Einfallswinkel und den Brechungsindizes der beteiligten durchsichtigen Medien ist das an der Grenzfläche reflektierte Licht teilweise polarisiert. Wenn der reflektierte und der gebrochene Strahl aufeinander senkrecht stehen, ist das reflektierte Licht polarisiert. In diesem Fall heißt der Einfallswinkel des Lichtes auch Polarisationswinkel θ_p .

$$\tan(\theta_p) = \frac{n_1}{n_2}$$

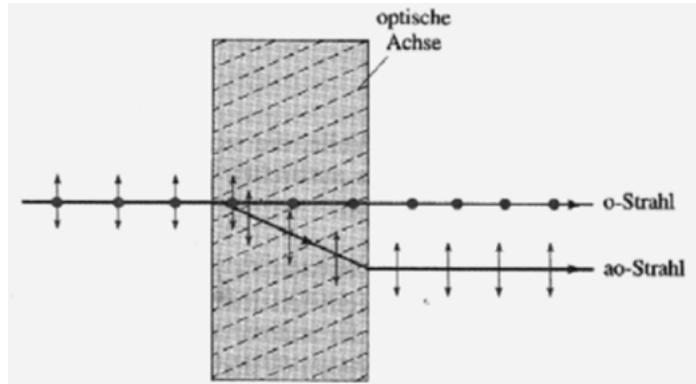
Diese Beziehung ist das Gesetz von Brewster.

Die Polarisation durch Reflexion lässt sich durch die Oszillation der Moleküle im Medium erklären. Nur jene Schwingungen der molekularen Dipole, die senkrecht zur Einfallsebene schwingen, tragen zur Intensität des reflektierten Lichtes bei.

Polarisation durch Doppelbrechung

In manchen Kunststoffen und einigen nichtkubischen Kristallen, wie etwa dem Kalkspat, beobachtet man ein besonderes Phänomen: die Doppelbrechung. Wegen ihrer Kristallgitterstruktur sind diese Materialien optisch anisotrop, was nichts anderes bedeutet, als dass sich das Licht in ihnen nicht in alle Richtungen gleich schnell ausbreitet, wie es in isotropen Materialien der Fall ist.

In diesen anisotropen Materialien werden die Lichtstrahlen in zwei Teilstrahlen, den ordentlichen Strahl und den außerordentlichen Strahl aufgespalten.



Interferenz und Beugung

Interferenzerscheinungen entstehen, wenn mindestens zwei Wellensysteme zusammentreffen. Der resultierende Vorgang kann näherungsweise durch ungestörte Überlagerung der beiden Wellensysteme konstruiert werden, das heißt, jedes Wellensystem breitet sich so aus, als ob das andere nicht vorhanden wäre. Das durch Überlagerung der beiden Lichtwellenfelder resultierende Wellenfeld wird an jeder Stelle dadurch erhalten, dass man die primären Felder vektoriell addiert.

Die beiden Wellen sollen gleiche Frequenz ω und Wellenlängen λ besitzen. Die elektrischen Feldstärken sollen gleich polarisiert sein. Für die Feldstärke im Punkt P gilt:

$$E_1 = A_1 \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} - \delta_1 \right)$$

$$E_2 = A_2 \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} - \delta_2 \right)$$

$$E = E_1 + E_2$$

Die beobachtete Intensität im Punkt P ist proportional dem Quadrat der Feldstärke. Der Proportionalitätsfaktor hat die Dimension eines Widerstandes und heißt demnach Wellenwiderstand. Er wird mit Z bezeichnet und hat im Vakuum die Größe $Z = 377\Omega$. Somit ergibt sich für die Intensität I :

$$I = \frac{1}{Z} \langle (E_1 + E_2)^2 \rangle$$

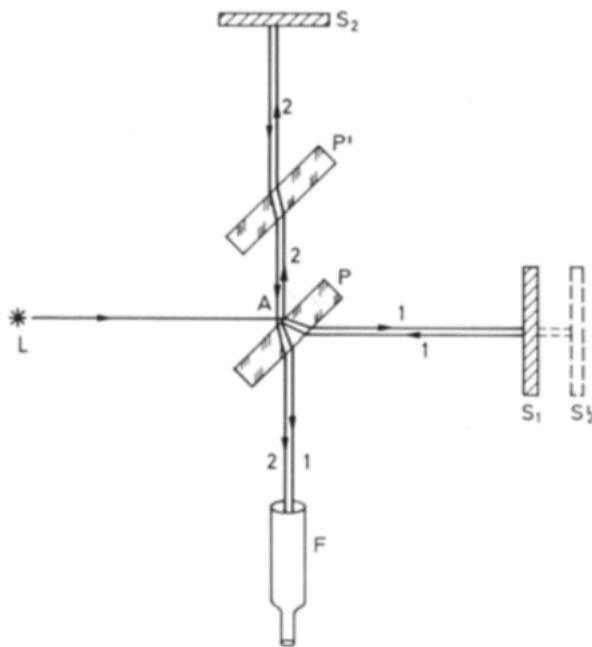
$\langle \rangle$... Bildung des zeitlichen Mittelwerts.

$$I_1 = \frac{1}{2Z} (A_1)^2 \text{ und } I_2 = \frac{1}{2Z} (A_2)^2$$

Gesamtintensität ist gegeben durch

$$I = I_1 + I_2 + 2 * \sqrt{I_1 I_2} \cos 2\pi \left(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_2 - \delta_1 \right)$$

Michelson Interferometer



Ein von L ausgehender Lichtstrahl fällt unter 45° auf eine halbdurchlässige, verspiegelte Glasplatte P , wodurch er in zwei senkrechte Strahlen 1 und 2 aufgespalten wird.

Beide Strahlen werden an den senkrechten Spiegeln S_1 und S_2 reflektiert und treffen auf P , wo sie nochmals in je zwei Teile zerlegt und ins Fernrohr F gelangen. Die Platte P' dient nur zur Korrektur, damit die Lichtwege 1 und 2 gleichwertig sind. Sind S_1 und S_2 vom Punkt A auf der Platte gleich weit entfernt, so treffen die beiden Strahlen ohne Gangunterschied bei F ein und verstärken sich. Eine solche Verstärkung tritt auch ein, wenn ein Spiegel um ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge verschoben wird. Dagegen löschen sich die beiden Strahlen im Fernrohr aus, wenn ein Spiegel um ein ungerades Vielfaches einer Viertelwellenlänge längs der Strahlrichtung verschoben wird. Durch Verschieben eines Spiegels mit Hilfe einer Mikrometerschraube lassen sich optische Wellenlängen absolut messen. Mit dem nach ihm benannten Interferometer hat Michelson die Länge des Urmeters mit Hilfe der orangen Krypton-Linie ausgewertet.

Beugung

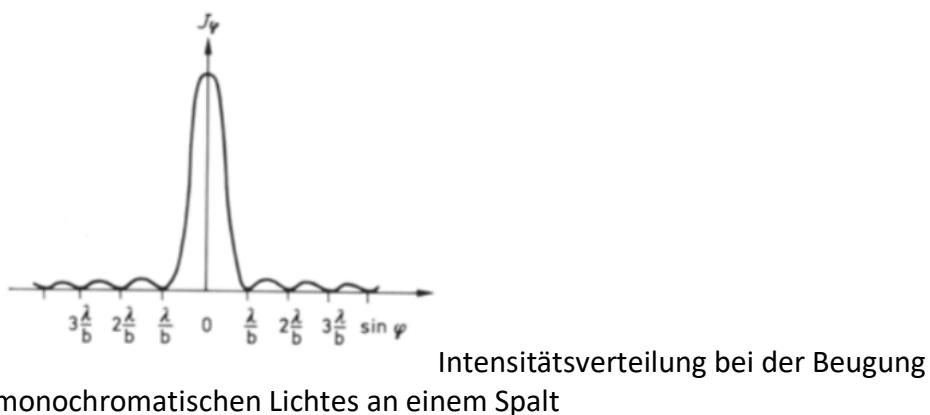
Unter der Beugung des Lichts versteht man die Abweichung der Lichtausbreitung von den Gesetzen der geometrischen Optik, die immer dann auftreten, wenn die freie Ausbreitung der Wellen durch irgendwelche Hindernisse beeinflusst wird. In der Praxistreten sie nur dann auf, wenn die Hindernisse etwa die gleiche Größenordnung haben wie die Lichtwellenlänge.

Experimentell erzeugen wir eine derartige Beugungerscheinung, indem wir einen schmalen Lichtstrahl (zB. Laser) auf einen Spalt veränderlicher Breite treffen lassen. Solange der Spalt hinreichend breit ist, bleibt das Bild der Lichtquelle auf einem Schirm scharf. Verkleinert man nun die Spaltbreite, so wird der Lichtpunkt zusehends breiter und verwaschener. Bei monochromatischem Licht treten rechts und links vom zentralen hellen Bild eine Anzahl heller und dunkler Streifen auf. Diese werden um so schmäler und enger, je kurzwelliger das benützte Licht ist.

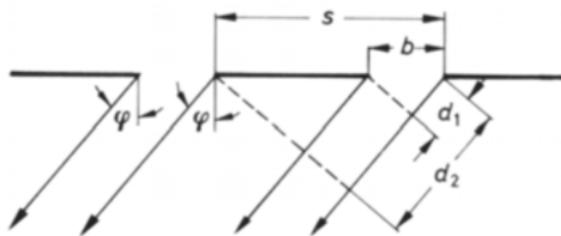
$$\text{Minima: } \sin \varphi_k = \frac{k\lambda}{b} \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$

$$\text{Helligkeitsmaximalen: } \sin \varphi_k = \frac{(2k+1)\lambda}{b}$$

Die Intensität der Helligkeitsmaxima werden um so schwächer je größer der Winkel φ_k ist.

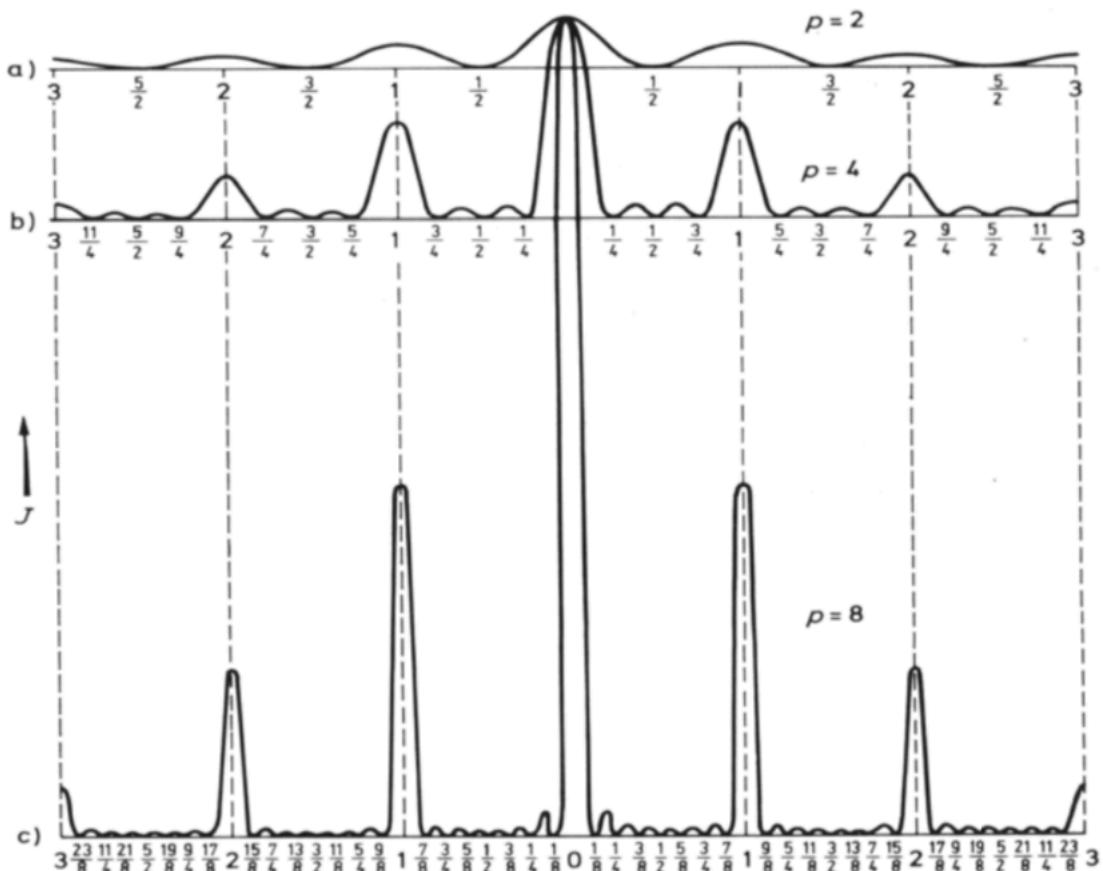


Beugung am Gitter



Von großer Bedeutung sind Beugungerscheinungen, die durch mehrere in regelmäßigen Abständen nebeneinander liegender Öffnungen, sogenannte Gitter, hervorgebracht werden. Es ist wichtig, dass auch hier die Kohärenzbedingung für die ganze Gitterbreite erfüllt ist. Das Gitter besitze p Öffnungen, so dass wir auch p interferierende Strahlenbündel haben. Die Spaltbreite sei mit b bezeichnet, der Abstand zweier Spalte, von der Mitte gemessen, sei s (Gitterkonstante).

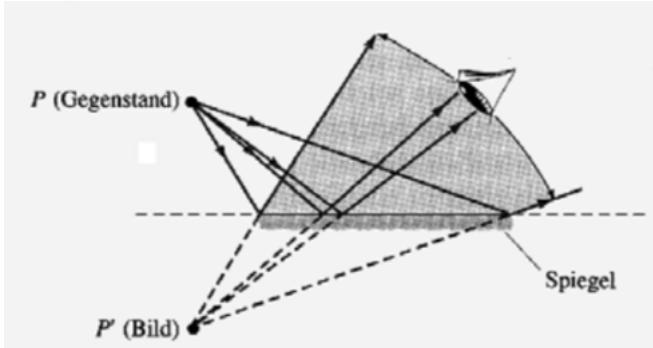
Die Beugungsmaxima sind um so intensiver und schmäler, je größer die Zahl der beugenden Öffnungen sind. Die Intensitätsverteilungen die sich durch 2, 4 oder 8 Spalte ergeben ist:



Geometrische Optik

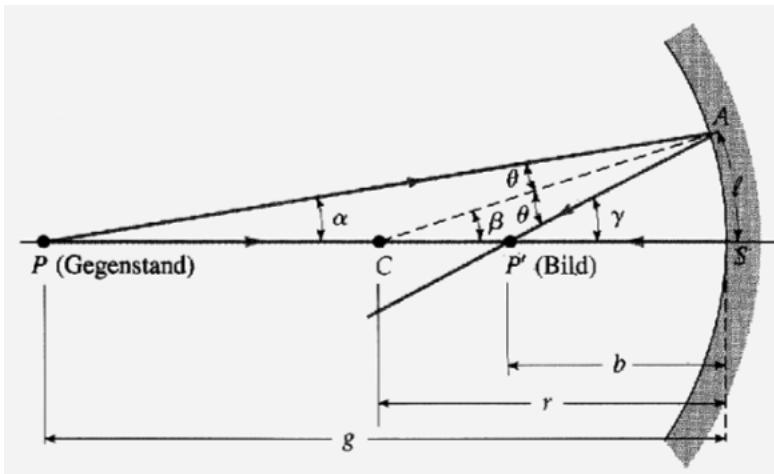
Man kann Beugungseffekte vernachlässigen, sofern man die Wellenlänge des Lichtes hinreichend klein gegenüber der Größe der Hindernisse und Öffnungen im Lichtweg annimmt.

Spiegel



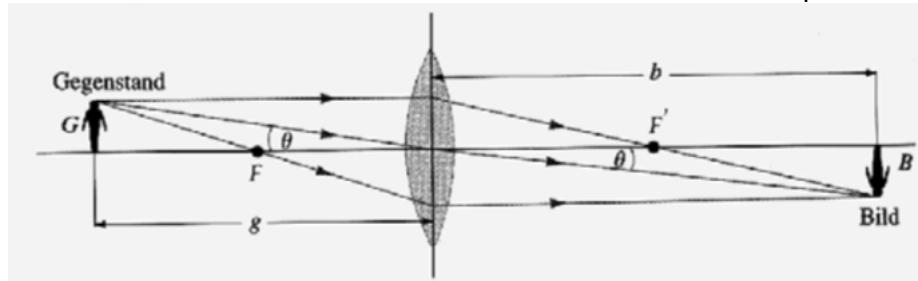
Das beobachtete virtuelle Bild P' erscheint in der geradlinigen Verlängerung des Sehstrahles so, als gingen die Strahlen von diesem aus. Mit dem Auge lässt sich nicht erkennen, dass die von P ausgehende Strahlenbündel vorher bereits reflektiert wurden, da auch der Abstand vom Spiegel zwischen Gegenstand und Bild der gleiche ist.

Anders ist das bei Konkavspiegel. Die reflektierten Strahlen schneiden sich im Punkt P' und breiten sich von hier so aus, als ob der Gegenstand an dieser Stelle stehen würde. Es handelt sich daher um ein reelles Bild.



Linsen

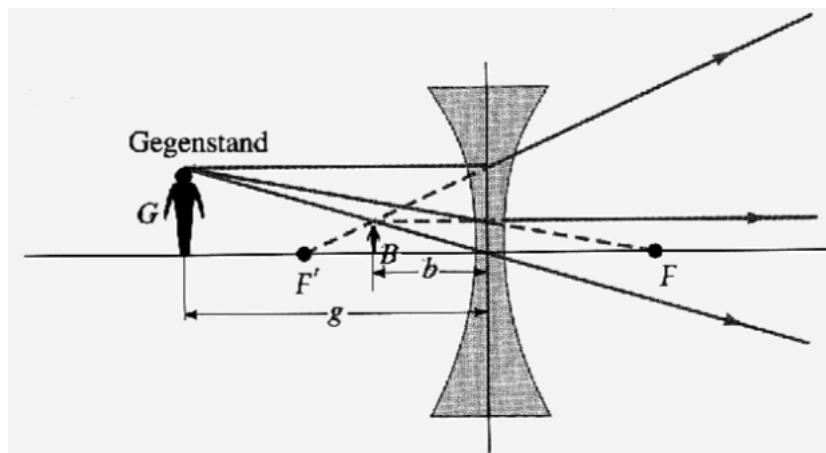
Da die Linse zwei Krümmungsradien aufweist, gibt es auch zwei Brennpunkte gerechnet von der Mitte der Linse aus. Die reziproke Brennweite wird oft als Brechkraft oder Brechwert einer Linse bezeichnet. Die Einheit der Brechkraft ist eine Dioptrien D .



Sammellinse

- Der achsenparallele Strahl wird so gebrochen, dass er durch den rechten Brennpunkt der Linse verläuft
- Der zentrale Strahl verläuft durch den Mittelpunkt und wird nicht abgelenkt
- Der Brennpunktstrahl verläuft durch den linken Brennpunkt und verlässt die Linse parallel zur Achse

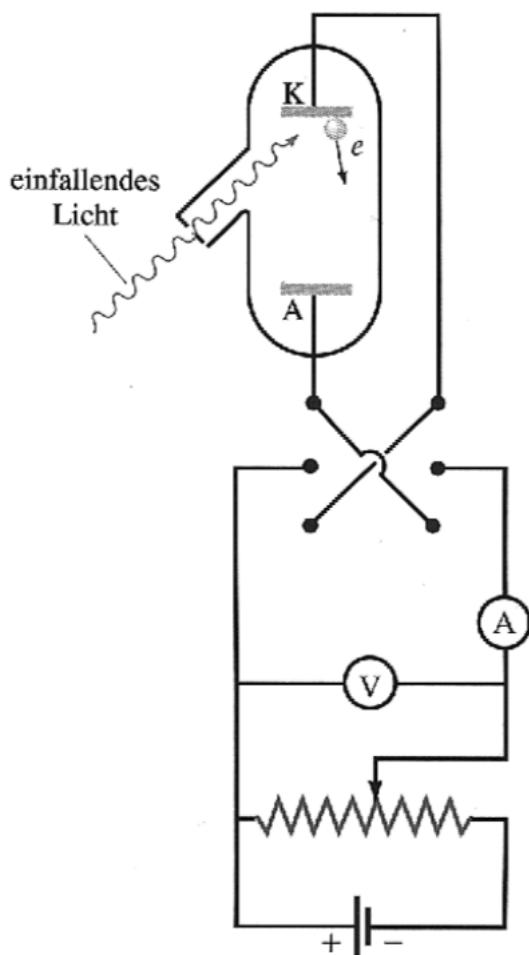
$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$



Streulinse

- Der achsenparallele Strahl verlässt die Linse so, als ginge er vom linken Brennpunkt aus
- Der zentrale Strahl verläuft durch den Mittelpunkt der Linse und wird nicht abgelenkt
- Der Brennpunktstrahl ist auf den rechten Brennpunkt gerichtet und verlässt die Linse parallel zur optischen Achse

Photoelektrischer Effekt



Schematische Darstellung einer Apparatur zur Untersuchung des Photoeffektes. Licht trifft auf die Kathode K und schlägt Elektronen aus dieser heraus. Die Anzahl der Elektronen, die die Anode A erreichen, wird durch eine Messung des durch die Röhre fließenden Stromes bestimmt. An die Anode kann eine relativ zur Kathode positive oder negative Spannung angelegt werden, um die Elektronen anzuziehen bzw. abzustoßen.

Durch die aus der Metalloberfläche der Kathode herausgeschlagenen Elektronen fließt in der Anode ein Strom. Bei einer positiven Anodenspannung werden die Elektronen zu dieser hinbeschleunigt und wenn U groß genug ist, erreichen alle Elektronen die Anode. Eine weitere Erhöhung der Spannung führt nunmehr nicht zu einem größeren Strom, es stellt sich vielmehr ein Maximalwert ein. Lenard beobachtete, dass dieser Sättigungswert proportional zur einfallenden Lichtintensität ist.

Es wurde erwartet, dass eine Erhöhung der Lichtintensität zu einem Anstieg der von einem Elektron absorbierten Energie und damit zu einer größeren kinetischen Energie des Elektrons führen würde. Dies war jedoch nicht der Fall! Die maximale Bremsspannung U_0 ist nicht von der Lichtintensität abhängig.

Bohr'sches Atommodell

Wenn man das Licht, das von Atomen emittiert wird, mit Hilfe eines Spektrometers zerlegt, so ergibt sich kein kontinuierliches Spektrum, sondern eine Serie von diskreten Linien. Jede Farbe entspricht einer bestimmten Wellenlänge und die Abstände der Linien, sowie deren Intensitäten sind für jedes Element typisch, vergleichbar einem Fingerabdruck.

Erstes Bohr'sches Postulat

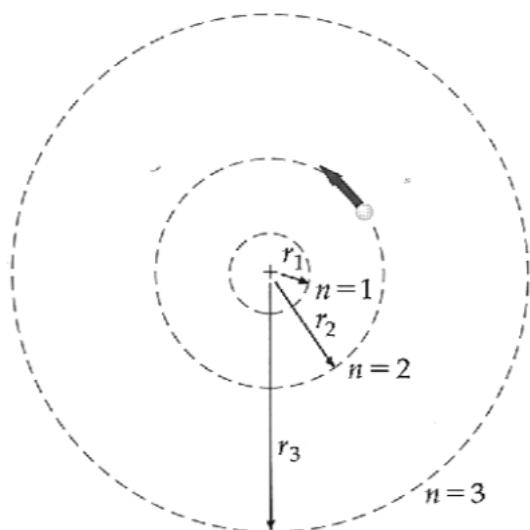
In einem Atom bewegen sich Elektronen nach den Gesetzen der klassischen Mechanik auf diskreten Kreisbahnen mit den Energien E_n

Zweites Bohr'sches Postulat

Die Bewegung der Elektronen erfolgt strahlungslos. Beim Übergang eines Elektrons von einem stationären Zustand mit Energie E_a in einen stationären Zustand niedriger Energie E_e wird ein Photon mit der Frequenz $\omega = \frac{E_a - E_e}{h}$ emittiert.

Drittes Bohr'sches Postulat

Der Drehimpuls eines Elektrons in einem stationären Zustand nimmt nur nachfolgende diskrete Werte an, wobei n eine natürliche Zahl sei: $m\omega r = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar$

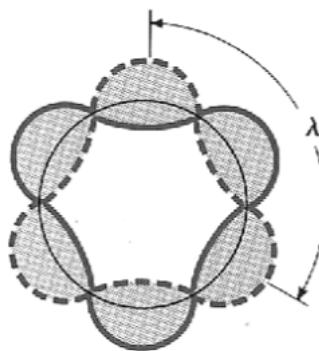


Stationäre Bahnen des Bohr'schen Modells für das Wasserstoffatom

Welleneigenschaften des Elektrons

11 Jahre nach Bohrs Postulaten stellte Louis de Broglie in seiner Doktorarbeit die durchaus gewagte Vermutung auf, dass Elektronen Welleneigenschaften besitzen. Dies führte in weiterer Folge zur Entwicklung der Wellenmechanik, die heute meist als Quantenmechanik bezeichnet wird und durch die alle Schwächen des Bohr'schen Modells beseitigt werden konnten. De Broglie argumentierte mit dem Dualismus des Photons und verwendete die schon bekannten Gleichungen

$$\omega = \frac{E}{\hbar} \text{ und } \lambda = \frac{\hbar}{p}$$



Stehende Welle auf einer Kreisbahn

In der klassischen Wellenlehre führt die Existenz von stehenden Wellen auf eine Quantisierung der Frequenz. Die Bedingung für eine an beiden Enden feste Saite mit der Länge l lautet

$$n \frac{\lambda}{2} = l$$

Für Wellen mit der Geschwindigkeit ω auf der Saite erhält man diskrete Frequenzwerte mit

$$\omega = \frac{\omega}{\lambda} = n \frac{\omega}{2l}$$

Schrödinger Gleichung

Die weitere Ausarbeitung der Idee, diskrete Energien eines Systems durch stehende Wellen zu beschreiben, erfolgte durch Schrödinger. In dieser Theorie wird das Elektron durch eine Wellenfunktion Ψ beschrieben. Für das Wasserstoffatom ergeben sich dann dieselben Energieniveaus, die schon Bohr gefunden hatte. Somit ist die Quantenmechanik eine allgemeine Methode, um Energiewerte eines Systems zu berechnen.

Frequenz und Wellenlänge des Elektrons stehen im selben Zusammenhang zur Energie und zum Impuls eines Elektrons wie die Frequenz und die Wellenlänge von Lichtwellen zur Energie und zum Impuls eines Photons. Es ist jedoch nicht möglich, die Schrödinger Gleichung so wie die klassische Wellengleichung herzuleiten. Ebenso wenig ließen sich die Newton'schen Gesetze herleiten.

Zeitunabhängige Schrödinger Gleichung

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x)$$

Welle-Teilchen Dualismus

Doppelspaltexperiment

Unschärferelation

Ein Teilchenstrahl ist nie eine beliebige dünne Linie, sondern weist stets eine Dicke auf, welche größer als die de-Broglie-Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{p}$ sein muss. Andernfalls kommt es zu Beugungerscheinungen und die Teilchen laufen auseinander. Für die Messung eines Teilchens besteht also eine Unschärfe, die mit der räumlichen Ausdehnung des Wellenpaketes verknüpft ist

1926 konnte Heisenberg zeigen, dass bei einer Messung von Ort und Impuls eines Teilchens das Produkt der Unschärfen immer größer als $\frac{\hbar}{2}$ ist. Diese Formulierung nennt man die Heisenberg'sche Unschärferelation. Sie bedeutet, dass sich Ort und Impuls nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmen lassen.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar$$