
Grundlagen der Physik

Optik

Ausbreitung des Lichts

Als Licht werden elektromagnetische Wellen bezeichnet, die im Empfindlichkeitsbereich des menschlichen Auges liegen. Das für den Menschen sichtbare Licht besitzt eine Wellenlänge von **400 nm** (violett) bis **700 nm** (rot).

Die Lichtgeschwindigkeit

In Vakuum (und näherungsweise auch in Luft) kann sich Licht mit etwa 300 000 Kilometer je Sekunde ausbreiten („Lichtgeschwindigkeit“). In anderen lichtdurchlässigen Stoffen ist die Lichtgeschwindigkeit geringer, in Wasser kann sich Licht beispielsweise „nur“ mit etwa 225 000 Kilometer je Sekunde ausbreiten.²

Die Lichtgeschwindigkeit

Medium	Lichtgeschwindigkeit in $\frac{\text{km}}{\text{s}}$
Vakuum	300 000
Luft	300 000
Wasser	225 000
Quarz	194 000
Glas	190 000
Diamant	122 000

Licht und Beleuchtungsstärke

Um die Helligkeit verschiedener Lichtquellen vergleichen zu können, wurde die Lichtstärke als physikalische Größe eingeführt. Erscheint eine Lichtquelle aus gleicher Entfernung heller als eine andere, so besitzt sie eine größere Lichtstärke.

Definition und Einheit:

Die Lichtstärke I_v ist eine Basisgröße des internationalen Einheitensystems. Ihre Einheit ist das Candela (cd).

Licht und Beleuchtungsstärke

Beispiele:

- Eine Kerzenflamme hat eine Lichtstärke von etwa 1 cd.
- Glühlampen haben eine Lichtstärke (je nach Bauart) von 15 cd bis 150 cd.
- Autoscheinwerfer haben eine Lichtstärke von rund 50000 cd.

Während die Lichtstärke I_v eine Eigenschaft der Lichtquelle ist, gibt die Beleuchtungsstärke E_v an, welcher Anteil des Lichts auf eine bestimmte Fläche trifft.

Da sich das Licht gleichmäßig in alle Richtungen ausbreitet, verteilen sich die Lichtstrahlen auf immer größere Flächen. Die Beleuchtungsstärke nimmt in gleichem Maß ab, wie die Oberfläche der mit Licht durchfluteten (Kugel-)Fläche zunimmt.

Licht und Beleuchtungsstärke

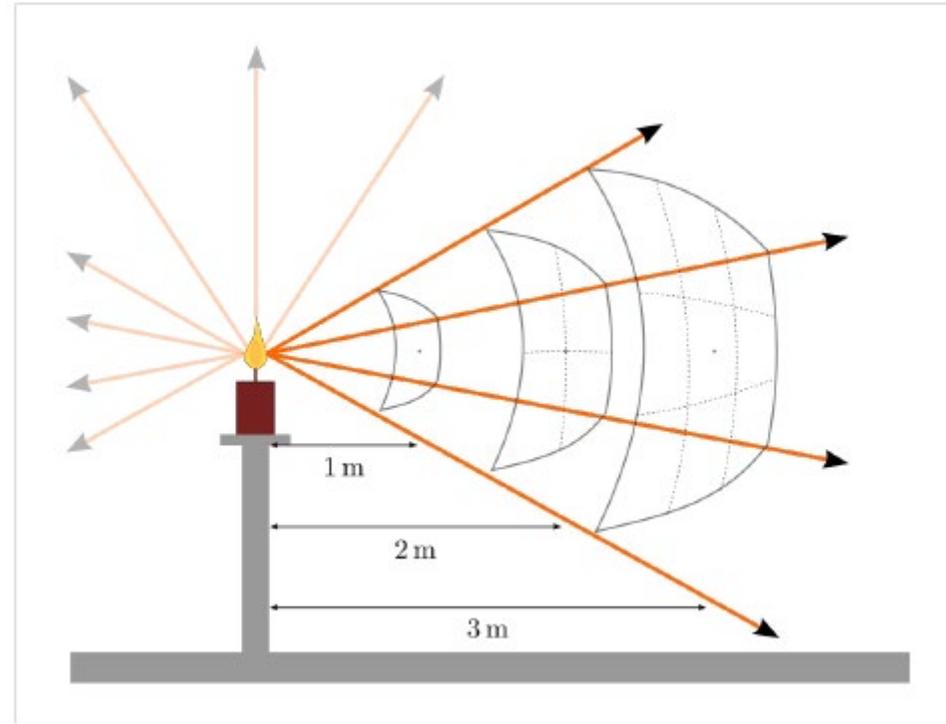
Formel und Einheit:

Die Beleuchtungsstärke E_v ist umso größer, je größer die Lichtstärke I_v der Lichtquelle ist. Gleichzeitig nimmt die Beleuchtungsstärke quadratisch mit dem Abstand r von der Lichtquelle ab. Insgesamt gilt:

$$E_v = \frac{I_v}{r^2}$$

Die Beleuchtungsstärke wird in Lux (lx) angegeben.

Licht und Beleuchtungsstärke



Die Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit des Abstands von der Lichtquelle.

Lichtdurchlässigkeit

Licht durchlässige Gegenstände gibt es auf zweierlei Arten:

- Durchsichtige Objekte (beispielsweise Fensterglas) lassen Licht so hindurch, dass Gegenstände hinter ihnen zu erkennen sind.
- Durchscheinende Objekte (beispielsweise Mattglas) lassen Licht so hindurch, dass Gegenstände hinter ihnen nicht zu erkennen sind.

Die Lichtdurchlässigkeit eines Objekts hängt vom Material und von der Schichtdicke ab. Wasser beispielsweise ist in dünnen Schichten Licht durchlässig, in dicken nicht; in großen Meerestiefen herrscht völlige Dunkelheit.

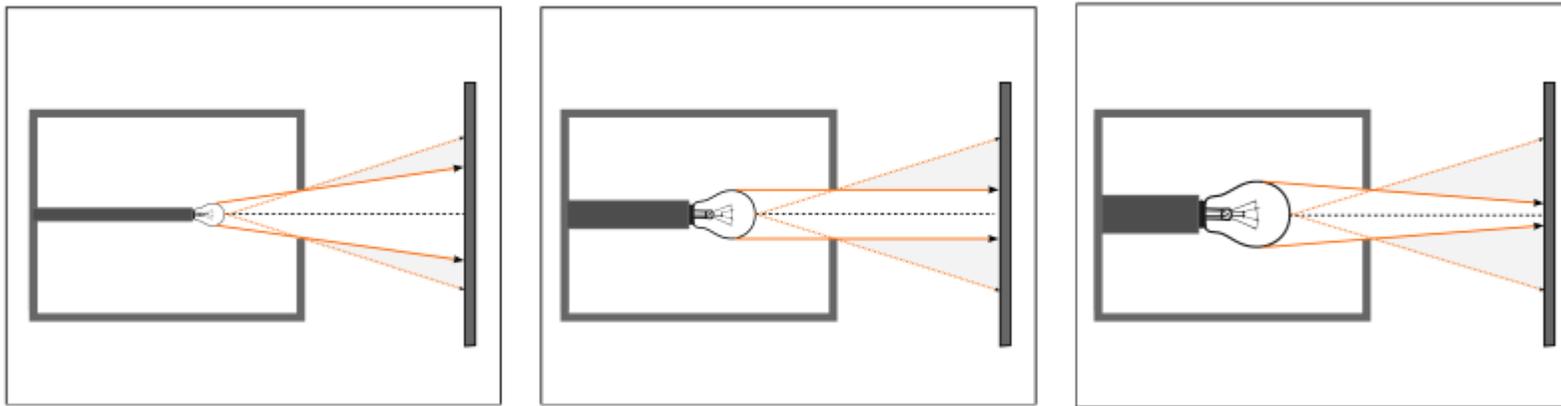
Lichtdurchlässigkeit



Eine Kerze hinter einer durchsichtigen, durchscheinenden Scheibe.

Die Blende

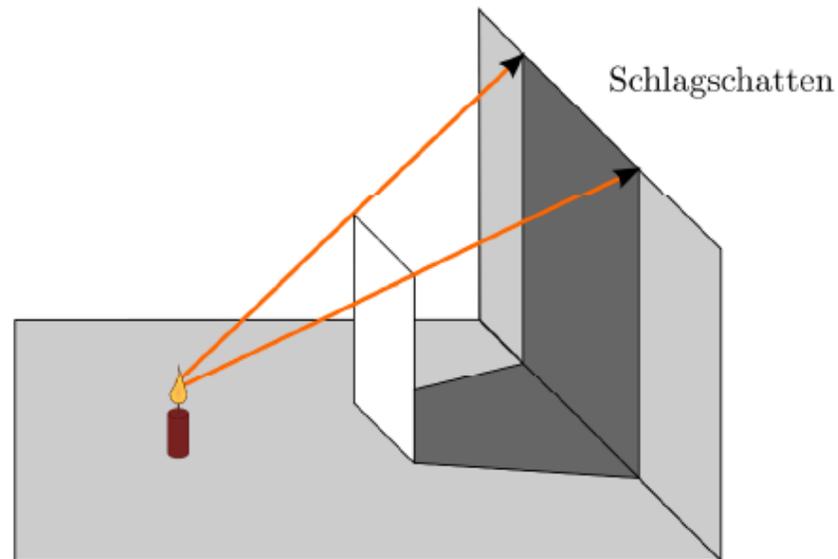
Eine Blende ist eine kleine, meist runde Öffnung in einem ansonsten undurchsichtigen Gegenstand. Durch eine Blende gelangt nur ein Teil des Lichts, ein „Lichtbündel“, hindurch. Dieses Lichtbündel kann zeichnerisch durch die Bündelachse und Randstrahlen dargestellt werden.



Entstehung von Lichtbündeln durch eine Blende.

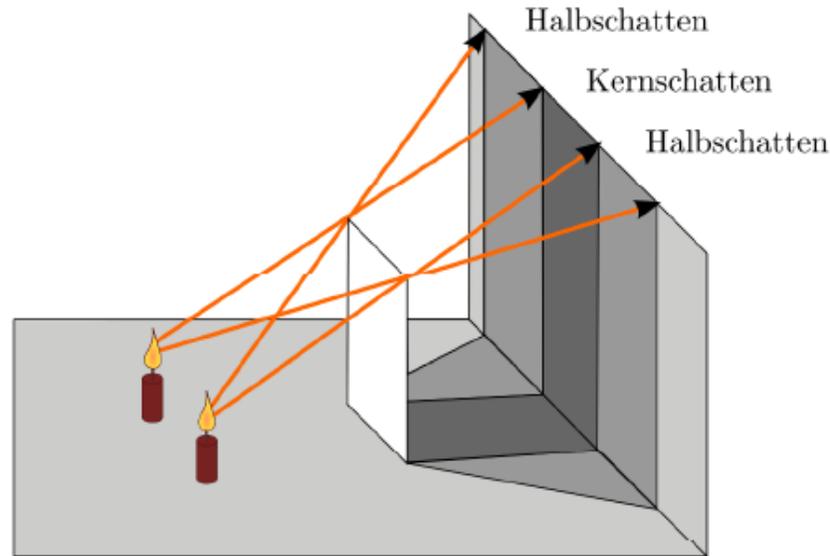
Der Schlagschatten

Wird ein undurchsichtiger Gegenstand von einer kleinen (punktförmigen) Lichtquelle beleuchtet, so entsteht auf der von der Lichtquelle abgewandten Seite ein Schatten.



Kern- und Halbschatten

Wird ein undurchsichtiger Gegenstand von zwei punktförmigen Lichtquellen beleuchtet, so bilden sich zwei Schattenzonen aus: Ein Kernschatten und ein Halbschatten. Eine ausgedehnte Lichtquelle erzeugt hinter einem Licht undurchlässigen Gegenstand ebenfalls einen Kern- und einen Halbschatten.³



Kern- und Halbschatten

Bei einer „diffusen“ Beleuchtung kommt das Licht aus vielen Richtungen. Die einzelnen Schattenbereiche heben sich dabei gegenseitig auf; es ist kein Schatten erkennbar.

Da manche Menschen (insbesondere kleine Kinder) schreckhaft auf Schatten reagieren, wird in Wohn- und Aufenthaltsräumen häufig eine indirekte Beleuchtung eingesetzt. Diese wird mittels *diffuser Reflexion* erreicht, indem eine helle, matte Oberfläche von einer (verdeckten) Lampe angestrahlt wird.

Reflexion von Licht

Gegenstände können, je nach Material und Art der Oberfläche, einen Teil des auf sie fallenden Lichts zurückwerfen. Diesen Vorgang nennt man Reflexion.

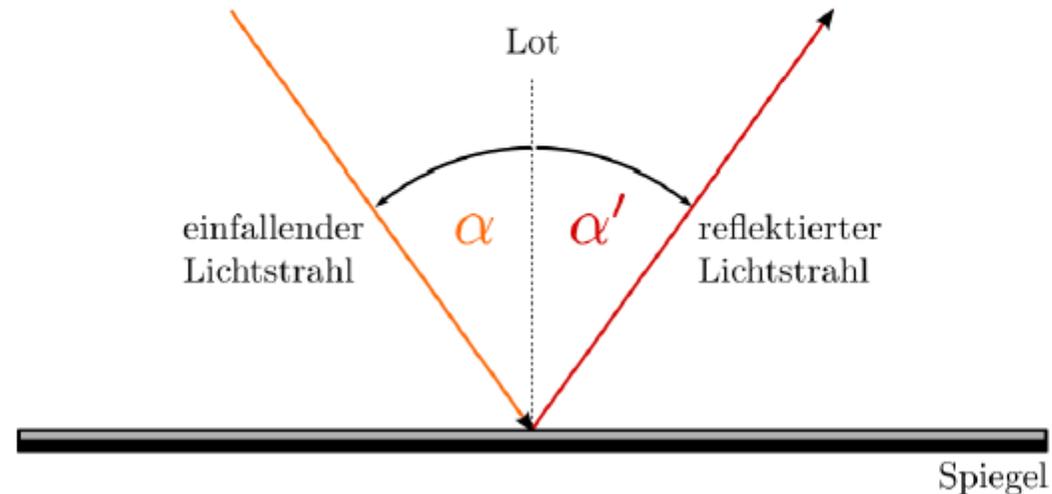
Wird (fast) das gesamte auf einen Gegenstand fallende Licht reflektiert, so spricht man von einer Spiegelung. Je nach Form und Struktur der spiegelnden Oberfläche unterscheidet man zwischen ebenen und gewölbten sowie zwischen glatten und rauhen Spiegeln.

Der ebene Spiegel

Jede glatte, ebene Fläche (beispielsweise eine glatte Metallplatte, eine ruhige Wasseroberfläche, eine Fensterscheibe usw.) wirkt wie ein ebener Spiegel. Während eine blank polierte Metalloberfläche das gesamte einfallende Licht zurückwirft, wird von Glas oder Wasser nur einen Teil des einfallenden Lichts reflektiert. Spiegel aus Glas sind daher gewöhnlich auf der Rückseite schwarz lackiert oder mit einer Licht undurchlässigen, dunklen Schicht versehen.

Das Reflexionsgesetz

Für ebene Spiegel gilt das Reflexionsgesetz: Jeder auftreffende Lichtstrahl verlässt den Spiegel im gleichen Winkel, wie er aufgetroffen ist.



Reflexion eines Lichtstrahls an einem ebenen Spiegel.

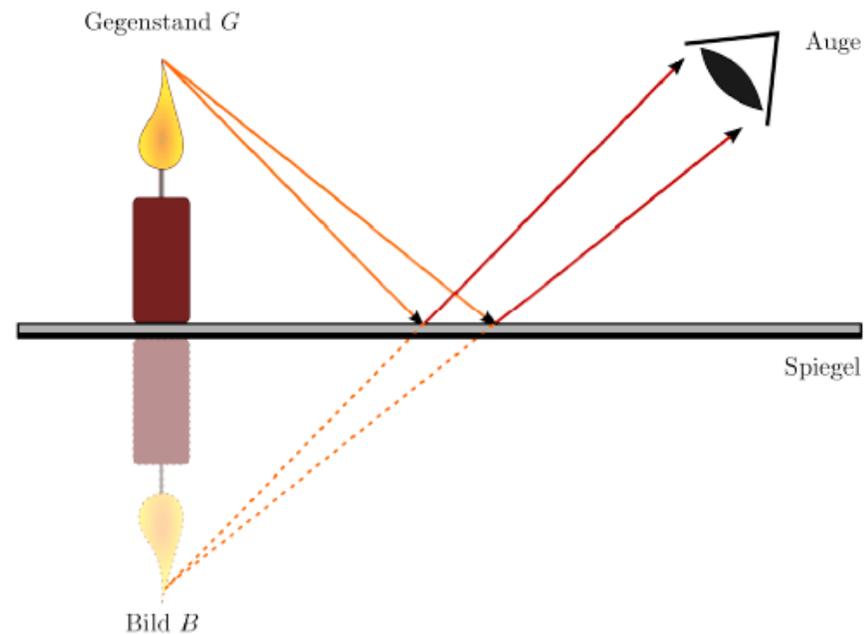
Das Reflexionsgesetz

Der Einfallswinkel α und der Reflexionswinkel α' werden dabei ausgehend von der Senkrechten zum Spiegel angegeben. Mathematisch lässt sich das Reflexionsgesetz damit folgendermaßen formulieren:

$$\alpha = \alpha'$$

Bildentstehung am ebenen Spiegel

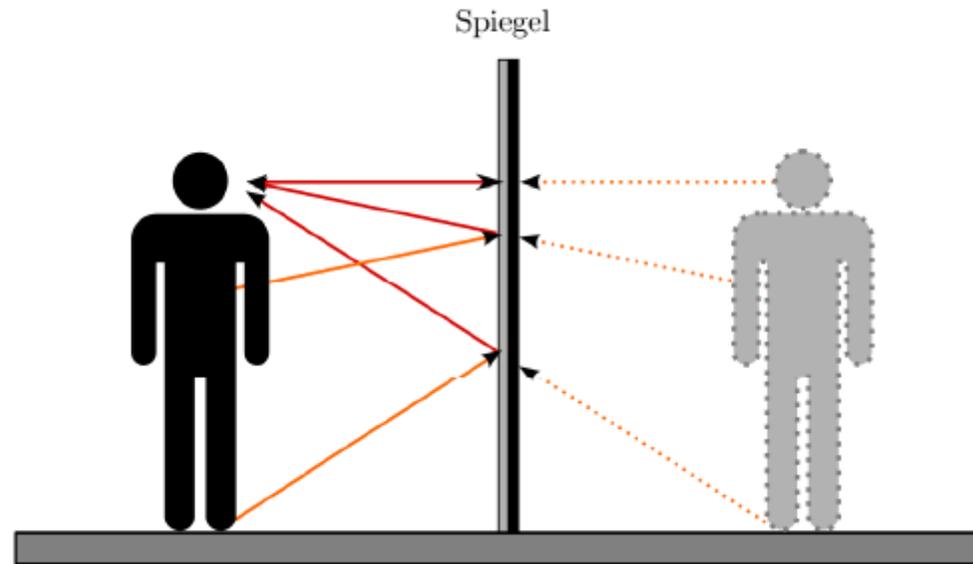
In einem Spiegel zeigt sich ein Bild der Gegenstände, die sich vor dem Spiegel befinden. Die entstehende Bild lässt sich zeichnerisch anhand des Reflexionsgesetzes (am besten mit Lineal und Winkelmesser) konstruieren.



Bildentstehung am ebenen Spiegel

Lichtstrahlen, die von einem Punkt des Gegenstandes **G**, ausgehen, treffen unter verschiedenen Einfallswinkeln auf den Spiegel und werden nach dem Reflexionsgesetz zurückgeworfen. Ein Teil der Strahlen gelangt in das Auge des Beobachters. Verlängert man diese Strahlen geradlinig nach hinten, so schneiden sie sich in einem Bildpunkt **B** hinter dem Spiegel. Für den Betrachter scheint das ins Auge fallende Licht von diesem Punkt auszugehen.

Bildentstehung am ebenen Spiegel



Gegenstandsgröße und Bildgröße an einem ebenen Spiegel.

Bildentstehung am ebenen Spiegel

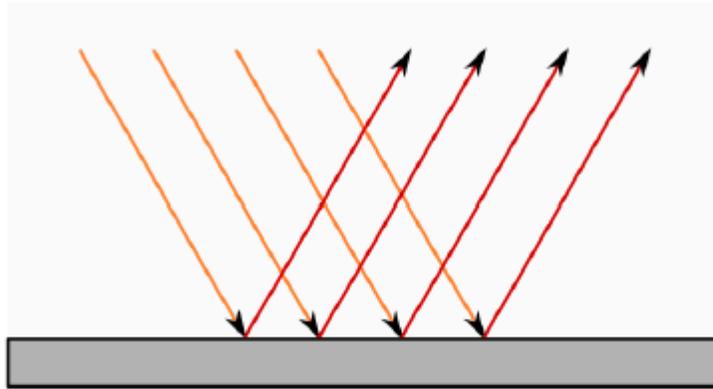
Insgesamt gilt somit für ebene Spiegel:

- Der Gegenstand und sein Bild liegen symmetrisch zur Spiegelfläche.
- Das Bild ist ebenso groß wie der Gegenstand.

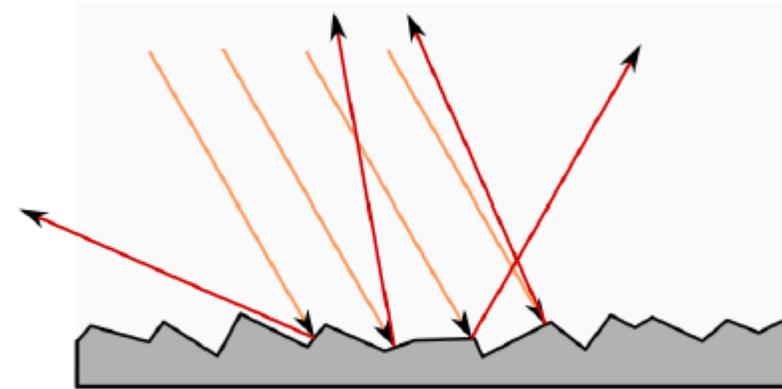
Jeder Bildpunkt B liegt daher ebenso weit hinter dem Spiegel, wie der passende Gegenstandspunkt G vor ihm liegt.

Direkte und diffuse Reflexion

Die Reflexion von Lichtstrahlen an einem ebenen, glatten Spiegel wird direkte Reflexion genannt. Treffen Lichtstrahlen allerdings auf einen ebenen Spiegel mit einer rauhen Oberfläche, so spricht man von einer diffusen Reflexion: Das Licht wird, wie in Abbildung *Direkte und diffuse Reflexion* (rechtes Bild) nach dem Reflexionsgesetz in verschiedene Richtungen zurückgeworfen („gestreut“).



Glatter Spiegel
Direkte Reflexion



Rauher Spiegel
Diffuse Reflexion

Gekrümmte Spiegel

Ist die Spiegelfläche gekrümmt, so gilt das Reflexionsgesetz für jede einzelne Stelle des Spiegels. Eine gute Vorstellung für einen gekrümmten Spiegel bietet eine Disko-Kugel, die mit zahlreichen kleinen Spiegelflächen das einfallende Licht kugelförmig in den Raum reflektiert.

Um die Entstehung der Bilder an einem gekrümmten Spiegel beschreiben zu können, verwendet man folgende Begriffe:

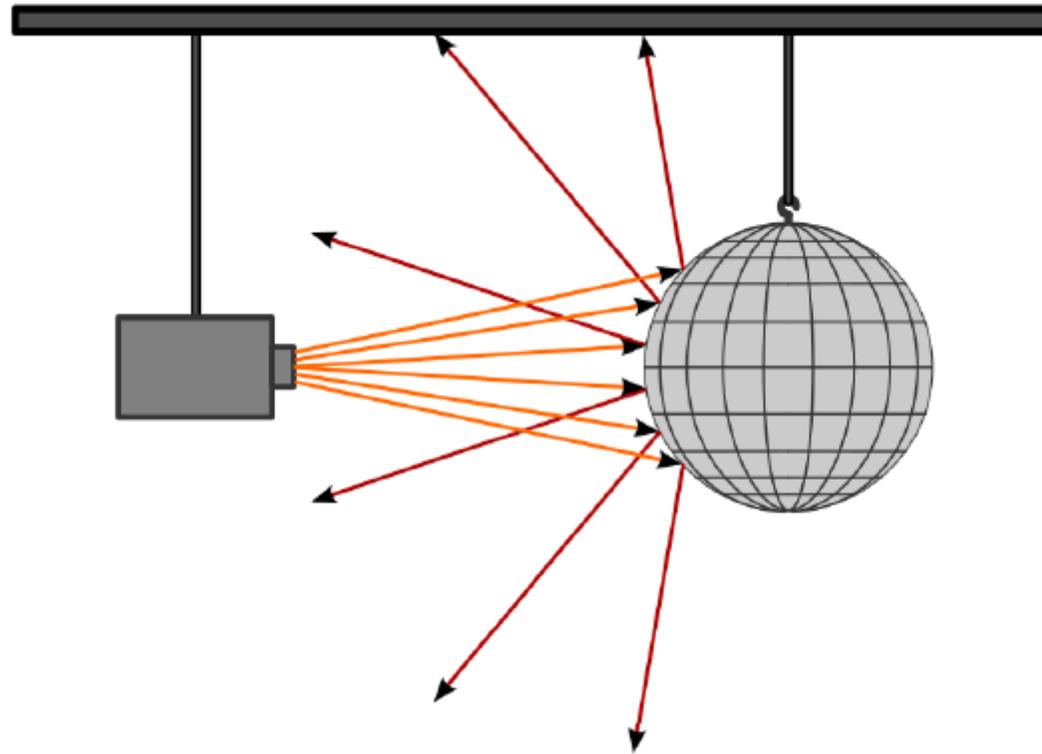
- Scheitelpunkt:

Der Mittelpunkt der spiegelnden Fläche wird Scheitelpunkt **S** genannt.

- Optische Achse:

Die Gerade, die senkrecht zur Spiegelebene verläuft und durch den Scheitelpunkt geht, heißt optische Achse. Alle Strahlen, die parallel zur optischen Achse verlaufen, werden Parallelstrahlen genannt.

Gekrümmte Spiegel



Eine Disko-Kugel als Wölbspiegel.

Gekrümmte Spiegel

- Brennpunkt (Fokus):

Alle auf den Spiegel treffenden Parallelstrahlen werden so reflektiert, dass sie sich in einem Punkt schneiden. Dieser Punkt liegt auf der optischen Achse und heißt Brennpunkt (Fokus) F .

Der Abstand des Brennpunkts zum Scheitelpunkt wird Brennweite f genannt. Bei einem kugelförmigen Hohlspiegel ist die Brennweite f gleich der Hälfte der Strecke zwischen dem Mittelpunkt M und dem Scheitelpunkt S :

$$f = \frac{\overline{MS}}{2}$$

Gekrümmte Spiegel

- Mittelpunkt:

Der Mittelpunkt M des Kreises, aus dem man sich den Wölbspiegel herausgeschnitten denken kann, liegt ebenfalls auf der optischen Achse. Strahlen, die auf der Innenseite des Kreises durch den Mittelpunkt gehen, werden stets auf sich selbst abgebildet.

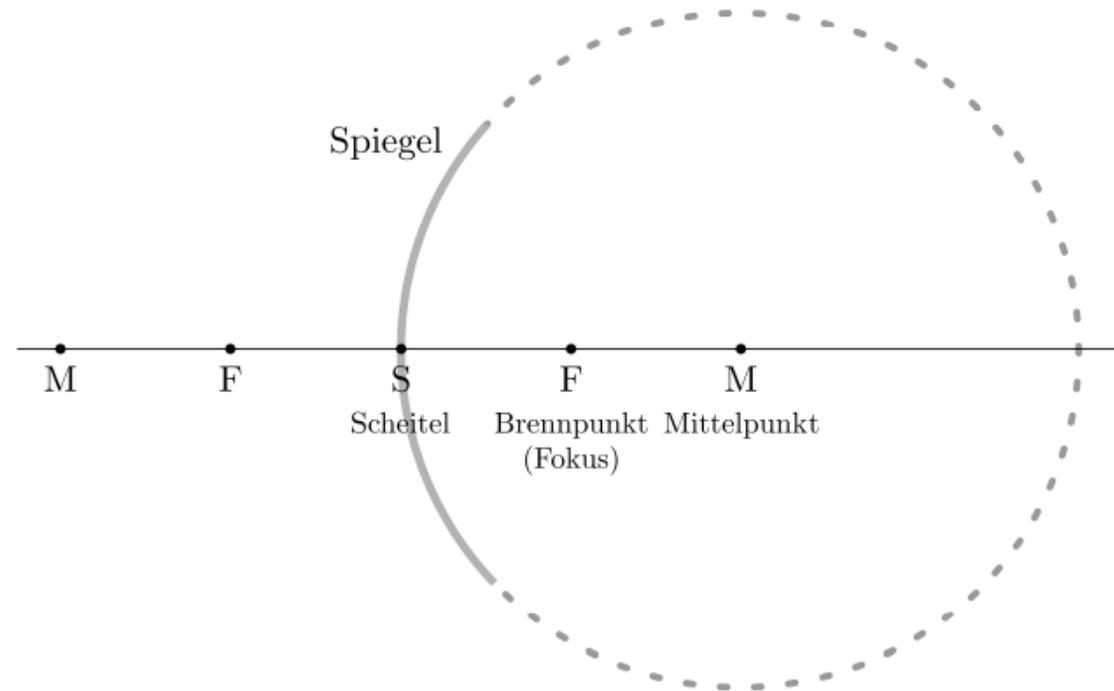
Je nachdem, welche Seite eines gekrümmten Spiegels dem Licht zugewandt ist, unterscheidet man zwischen einem Wölb- und einem Hohlspiegel.

Bildentstehung an einem Wölbspiegel

Ein Wölbspiegel (auch „Konvexspiegel“ genannt) erzeugt stets aufrechte, verkleinerte Bilder. Nähert man einen Gegenstand an die Spiegelfläche an, so wird das Bild des Gegenstands größer, bleibt dabei jedoch kleiner als das Original.

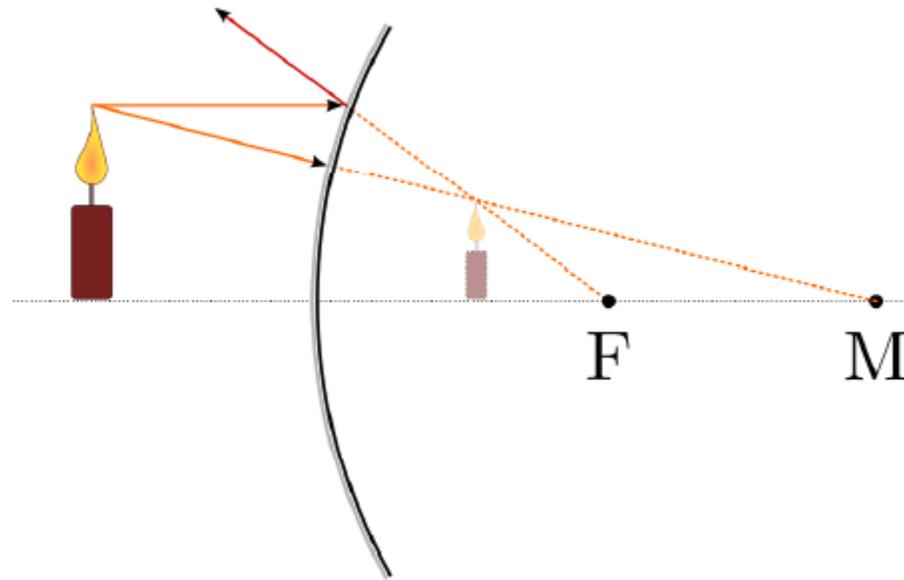
Gegenstände werden von Wölbspiegeln so abgebildet, als würden sie in kleinerem Maßstab im Inneren des Spiegels befinden.

Bildentstehung an einem Wölbspiegel



Markante Punkte für die Bildentstehung an einem gekrümmten Spiegel.

Bildentstehung an einem Wölbspiegel



Bildentstehung an einem Wölbspiegel.

Bildentstehung an einem Wölbspiegel

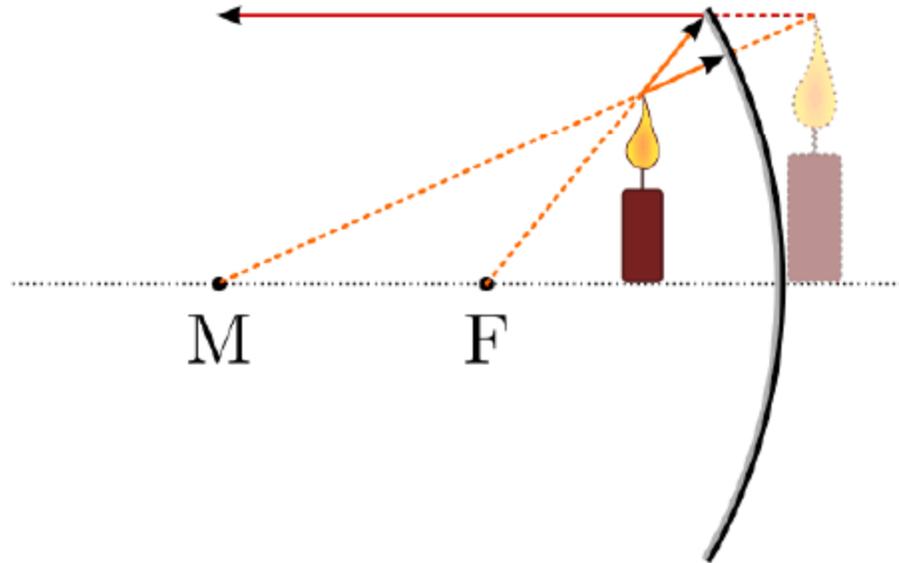
Da die Abbildungen eines Wölbspiegels nicht nur aufrecht und verkleinert, sondern auch seitenrichtig sind, werden sie häufig (beispielsweise im Straßenverkehr) zum Überblicken eines größeren Raumbereichs eingesetzt. Sie erlauben dabei sogar einen „Blick um die Ecke“: Egal ob man in Abbildung *Bildentstehung an einem Wölbspiegel* von schräg oben oder unten auf den Spiegel blickt, die Lichtstrahlen scheinen immer vom verkleinerten Bild der Kerze auf der Rückseite des Spiegels zu stammen.

Bildentstehung an einem Hohlspiegel

Bei einem Hohlspiegel („Konkavspiegel“) hängen der Ort und die Größe des erscheinenden Bildes von der Entfernung des Gegenstands zum Scheitelpunkt des Spiegels ab:

- Nähert man einen Gegenstand vom Brennpunkt her einem Hohlspiegel, so nähert sich auch das Bild dem Hohlspiegel. Hohlspiegel erzeugen vergrößerte, aufrechte und seitenvertauschte Bilder der Gegenstände, wenn sie sich innerhalb der Brennweite befinden.

Bildentstehung an einem Hohlspiegel



Bildentstehung an einem Hohlspiegel (Gegenstand innerhalb der Brennweite).

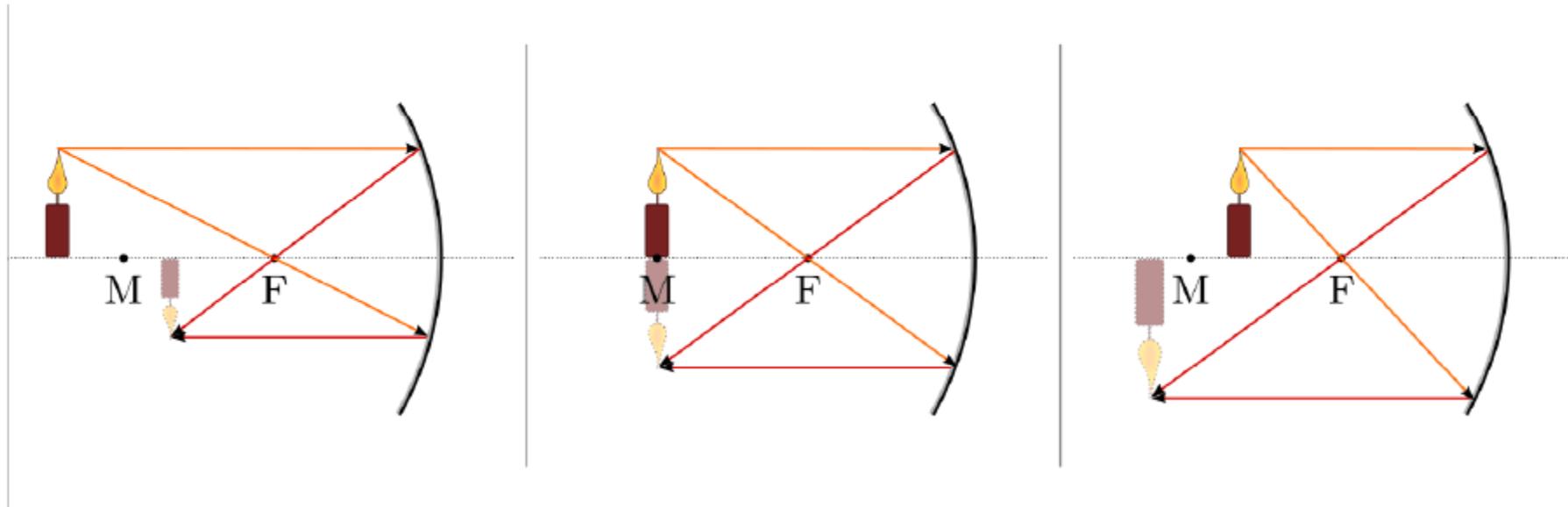
Bildentstehung an einem Hohlspiegel

Zur Konstruktion des Bildes zeichnet man die von einem Gegenstandspunkt ausgehenden Bildstrahlen in der umgekehrten Richtung weiter. Dabei muss man beachten, dass Brennpunktstrahlen zu Parallelstrahlen werden und Mittelpunktstrahlen stets senkrecht auf den Spiegel treffen und somit auf sich selbst abgebildet werden. Die Lage des Bildes entspricht dem Schnittpunkt des verlängerten Parallel- beziehungsweise Mittelpunktstrahls auf der Rückseite des Spiegels.

Aufgrund ihrer vergrößernden Wirkung werden flache Hohlspiegel (mit einer großen Brennweite) unter anderem als Kosmetikspiegel verwendet.

Bildentstehung an einem Hohlspiegel

- Nähert man einen Gegenstand einem Hohlspiegel aus weiter Entfernung, so entfernt sich das Bild vom Hohlspiegel: Hohlspiegel erzeugen umgekehrte, seitenvertauschte Bilder der Gegenstände, wenn sie sich außerhalb der Brennweite befinden.



Bildentstehung an einem Hohlspiegel (Gegenstand außerhalb der Brennweite).

Bildentstehung an einem Hohlspiegel

Zur Konstruktion des Bildes genügen wiederum die von einem Gegenstandspunkt ausgehenden Brennpunkt- und Parallelstrahlen, die durch den Hohlspiegel wiederum auf Parallel- beziehungsweise Brennpunktstrahlen abgebildet werden. Der Schnittpunkt der reflektierten Strahlen entspricht der Lage des Bildes.

Lichtbrechung

Trifft Licht auf die Grenzfläche zweier Stoffe, so wird es zum Teil reflektiert, zum Teil verändert es an der Grenze beider Stoffe seine Richtung. Senkrecht auftreffendes Licht ändert seine Richtung nicht.

Das Brechungsgesetz

Um das Brechungsgesetz zu formulieren, zeichnet man an der Stelle, an der das Licht auftrifft, eine Gerade senkrecht zur Grenzfläche. Der Winkel zwischen dieser Senkrechten und dem einfallenden Strahl wird Einfallswinkel α , der Winkel zwischen der Senkrechten und dem gebrochenen Strahl Brechungswinkel β genannt.

Das Brechungsgesetz

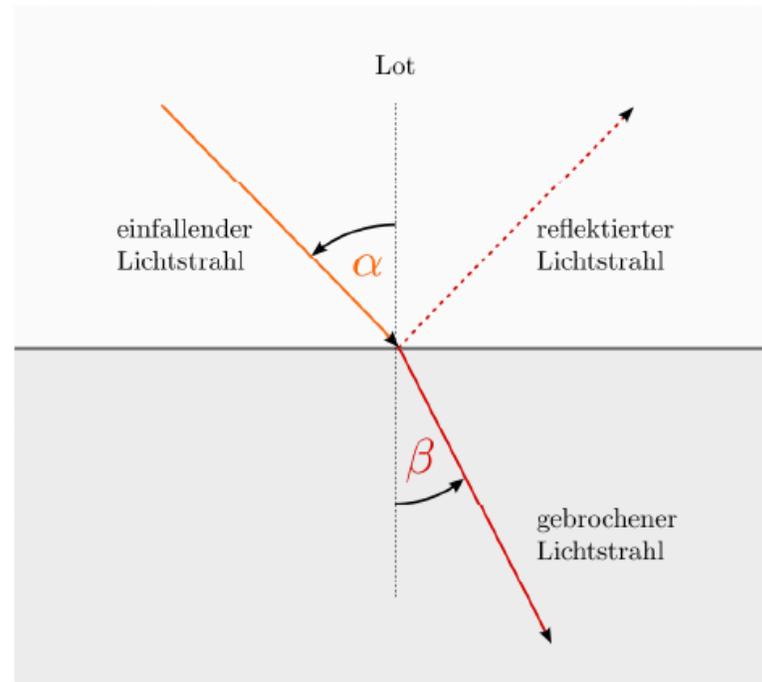
Brechzahl und Brechungsindex

Die Sinus-Werte der Einfallswinkel und Brechungswinkel, $\sin \alpha$ und $\sin \beta$, stehen im gleichen Verhältnis zueinander wie die Geschwindigkeiten c_1 und c_2 , die das Licht in den jeweiligen Stoffen erreichen kann. Breitet sich das Licht zunächst in Luft bzw. Vakuum aus und trifft auf ein transparentes Material, so ergibt das Verhältnis der Winkelgrößen einen konstanten, vom Material abhängigen Wert, der als (absolute) Brechzahl n bezeichnet wird:

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

Das Brechungsgesetz

Brechzahl und Brechungsindex



Lichtbrechung beim Übergang eines Lichtstrahls von einem optisch dünnen in ein optisch dickes Medium.

Das Brechungsgesetz

Brechzahl und Brechungsindex

Die (absolute) Brechzahl n gegenüber dem Vakuum ist eine für jeden Stoff charakteristische Materialeigenschaft.¹ Sie gibt gleichzeitig das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ($c_0 = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) zur die Lichtgeschwindigkeit c im jeweiligen Stoff an:

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

Für die Brechzahl von Vakuum gilt nach der obigen Formel $n_0 = 1$, für die Brechzahl von Luft in sehr guter Näherung ebenfalls.² In allen optischen Medien breitet sich das Licht mit geringerer Geschwindigkeit aus, so dass die (absoluten) Brechzahlen aller Materialien $n \geq 1$ gilt.

Das Brechungsgesetz

Brechzahl und Brechungsindex

Die unterschiedlichen Brechzahlen verschiedener Materialien, die in vielen Lehrbüchern und in tabellarischer Form abgedruckt sind, können bei optischen Versuchen zur Materialbestimmung genutzt werden.

Tab. 13: Brechzahlen gegenüber Vakuum für verschiedene Stoffe

Stoff	Brechzahl n_0
Eis	1,31
Wasser	1,33
Quarzglas	1,46
Plexiglas	1,49
Flintglas	1,70
Diamant	2,40

Das Brechungsgesetz

Brechzahl und Brechungsindex

Tritt ein Lichtstrahl von einem Stoff mit der Brechzahl n_1 in einen anderen Stoff mit einer höheren Brechzahl $n_2 > n_1$ über, so wird er zur Senkrechten hin gebrochen. In diesem Fall gibt die so genannte relative Brechzahl $\frac{n_2}{n_1}$ an, in welchem Verhältnis die Sinus-Werte des Einfallswinkels- und Brechungswinkels stehen:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Das Brechungsgesetz

Brechzahl und Brechungsindex

Beispiel:

- Licht breitet sich in Glas oder Wasser langsamer aus als in Luft. Das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit in Luft c_{Luft} zu der in Lichtgeschwindigkeit in Wasser c_{Wasser} ist daher größer als 1:

$$n_{\text{Luft} \rightarrow \text{Wasser}} = \frac{c_{\text{Luft}}}{c_{\text{Wasser}}} = \frac{300000 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{225000 \frac{\text{km}}{\text{s}}} = 1,33$$

Das bedeutet nichts anderes, als dass der Einfallswinkel α des Lichts um den Faktor 1,33 größer ist als der Brechungswinkel β . Das Licht wird zur senkrechten Gerade hin gebrochen.

Das Brechungsgesetz

Die Totalreflexion

Tritt ein Lichtstrahl von einem optischen Medium mit hoher Brechzahl n_1 in einen anderen Stoff mit niedriger Brechzahl n_2 über, so wird er von der Senkrechten weg gebrochen; der Brechungswinkel β ist in diesem Fall größer als der Einfallswinkel α . Konkret gilt:

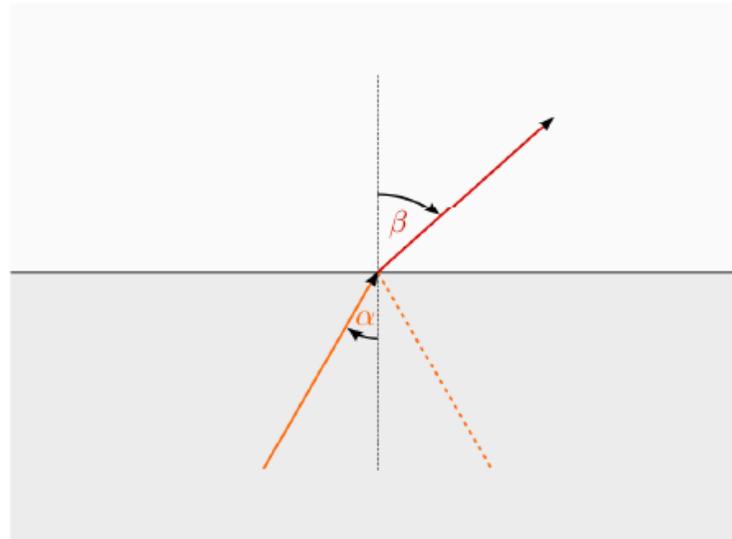
$$\sin \alpha = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \beta$$

Bei einem bestimmten, von den beiden Materialien abhängigen Einfallswinkel α_{\max} nimmt der Brechungswinkel β den Wert 90° an.

Das Brechungsgesetz

Die Totalreflexion

In diesem Fall kann der einfallende Lichtstrahl nicht mehr aus dem optisch dichteren Medium in das optisch dünnere Medium übergehen, sondern wird reflektiert beziehungsweise verläuft längs der Grenzfläche beider Medien.

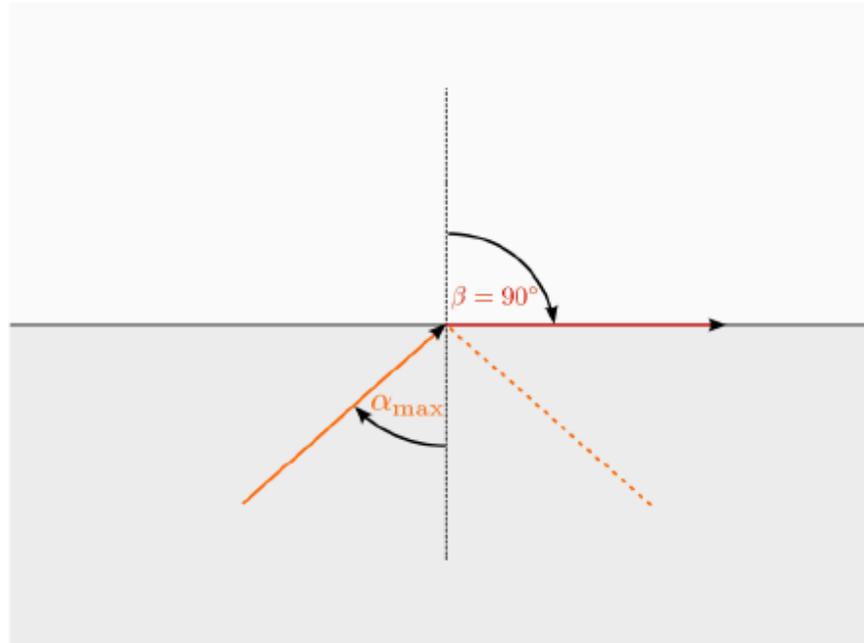


Das Brechungsgesetz

Die Totalreflexion

Da hierbei $\sin 90^\circ = 1$ gilt, vereinfacht sich die obige Gleichung (107) zu folgender Formel:

$$\sin \alpha_{\max} = \frac{n_2}{n_1}$$



Das Brechungsgesetz

Die Totalreflexion

Mit Hilfe eines Taschenrechners kann die Umkehrfunktion \arcsin des Sinus („Arcus-Sinus“) und somit der Grenzwinkel α für das Auftreten von Totalreflexion anhand der beiden Brechzahlen n_1 und n_2 berechnet werden:³

$$\alpha_{\max} = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

³ Exakt beträgt die Brechzahl laut [Wikipedia \(Brechungsindex\)](#) von Luft bei Normalbedingungen 1,000292. Starke Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen können zu Abweichungen führen und optische Effekte verursachen (beispielsweise Fata Morgana).

Das Brechungsgesetz

Die Totalreflexion

Hierbei ist zu beachten, dass bei der Totalreflexion n_1 die Brechzahl des optisch dichteren und n_2 die Brechzahl des optisch dünneren Mediums bezeichnet, also $n_1 > n_2$ und somit $\frac{n_1}{n_2} < 1$ gilt. Andernfalls kann keine Totalreflexion stattfinden.

Das Brechungsgesetz

Die Totalreflexion

Beispiel:

- Für den Übergang eines Lichtstrahls von Wasser in Luft ist $n_1 = 1,33$ und $n_2 = 1$. Somit ergibt $\frac{n_2}{n_1} \approx 0,752$ und $\alpha = \sin^{-1}(0,752) \cdot \frac{360^\circ}{2 \cdot \pi} \approx 48,75^\circ$.
- Für den Übergang eines Lichtstrahls von Quarzglas in Wasser ist $n_1 = 1,46$ und $n_2 = 1,33$. Somit ergibt $\frac{n_2}{n_1} \approx 0,911$ und $\alpha = \sin^{-1}(0,911) \cdot \frac{360^\circ}{2 \cdot \pi} \approx 65,64^\circ$.

Je größer der Unterschied der Brechzahlen n_1 und n_2 ist, desto kleiner ist der Grenzwinkel α_{\max} , ab dem Totalreflexion auftritt. Ist der Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel ($\alpha > \alpha_{\max}$), so wird der Lichtstrahl an der Grenzfläche vollständig gemäß dem *Reflexionsgesetz* zurückgeworfen. Diese Eigenschaft wird zur Konstruktion von optischen Glasfaser- bzw. Kunststofferkabeln als so genannte „Lichtleiter“ genutzt.

Das Brechungsgesetz

Die Totalreflexion



Totalreflexion in einem Lichtleiter.

Damit der Einfallswinkel an der Längswand stets groß genug ist, muss ein Lichtleiter möglichst dünn sein und darf nicht zu stark gebogen werden. Eine einzelne Faser eines Lichtleiter-Bündels hat meist einen Durchmesser von etwa 0,01 mm.

Das Brechungsgesetz

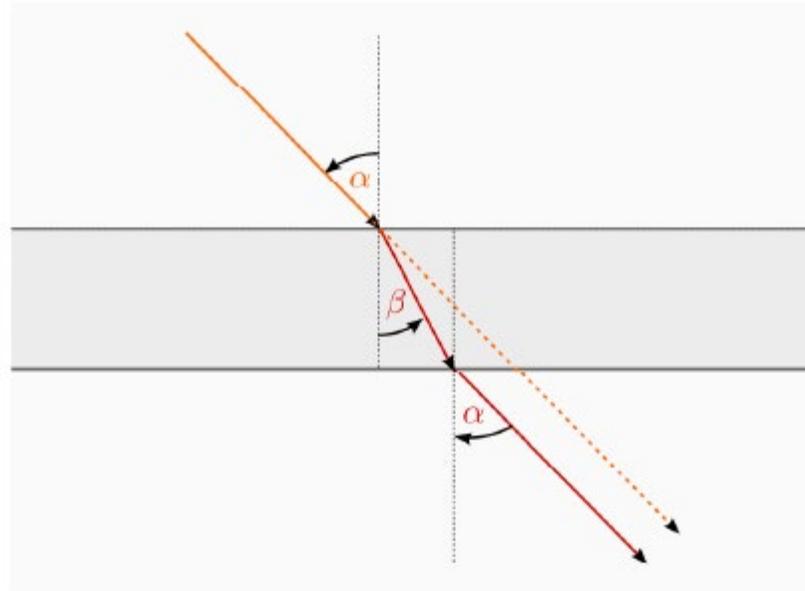
Doppelte Lichtbrechung an einer ebenen Platte

Beim Durchgang durch eine ebene Platte, beispielsweise eine Glasscheibe, wird ein Lichtstrahl zweimal gebrochen: Beim Eintritt wird der Strahl zur Senkrechten hin, beim Austritt von der Senkrechten weg gebrochen. Da die Brechzahlen und somit die Ablenkungen in beiden Fällen gleich sind, erfährt der Lichtstrahl insgesamt nur eine parallele Verschiebung. In vielen Fällen, insbesondere bei dünnen Scheiben, kann der Effekt vernachlässigt und der doppelt gebrochene Lichtstrahl durch einen einzelnen, geraden Lichtstrahl ersetzt werden.

Das Brechungsgesetz

Doppelte Lichtbrechung an einer ebenen Platte

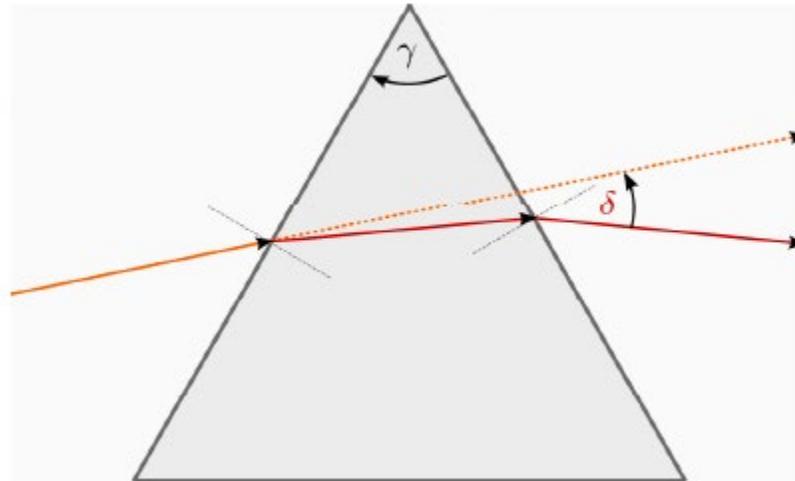
Eine *Totalreflexion* kann in diesem Fall nicht auftreten, da der Austrittswinkel des Lichtstrahls gleich dem Eintrittswinkel ist und für diesen (von der Senkrechten aus gemessen) stets $\alpha < 90^\circ$ gilt.



Das Brechungsgesetz

Doppelte Lichtbrechung an einem Prisma

Fällt ein Lichtstrahl auf ein Prisma, so wird er ebenfalls zweimal gebrochen – einmal beim Eintritt in das Prisma (Übergang Luft \rightarrow Glas) und ein weiteres mal beim Austritt aus dem Prisma (Übergang Glas \rightarrow Luft). Da die beiden Grenzflächen gegeneinander geneigt sind, wird der Lichtstrahl insgesamt zum dickeren Ende des Prismas hin abgelenkt.



Das Brechungsgesetz

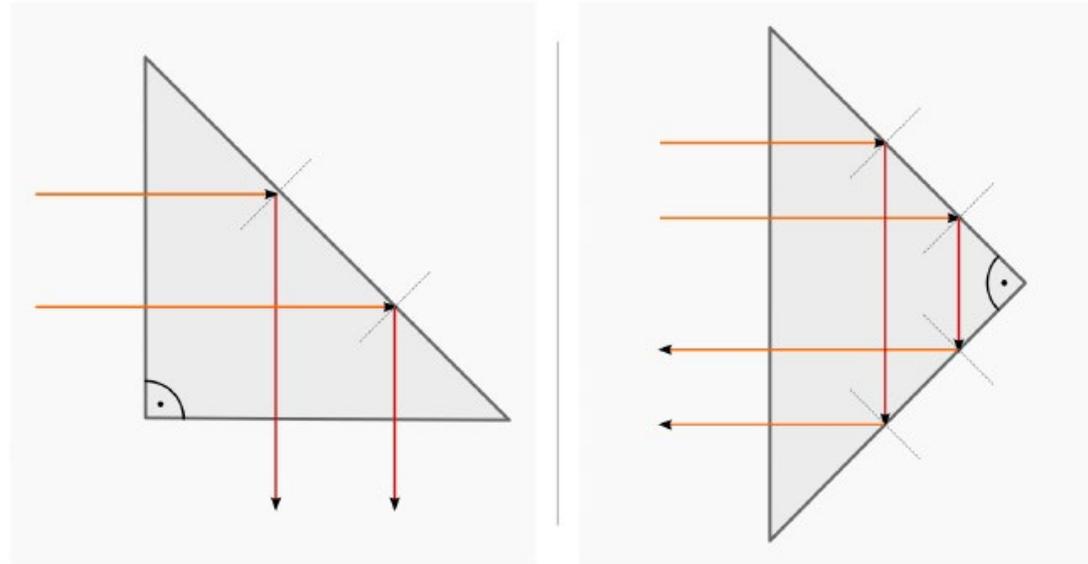
Doppelte Lichtbrechung an einem Prisma

Umso größer der Keilwinkel γ des Prismas ist (d.h. je stumpfer das Prisma ist), desto stärker ist der Winkel δ , um den der einfallende Lichtstrahl abgelenkt wird.

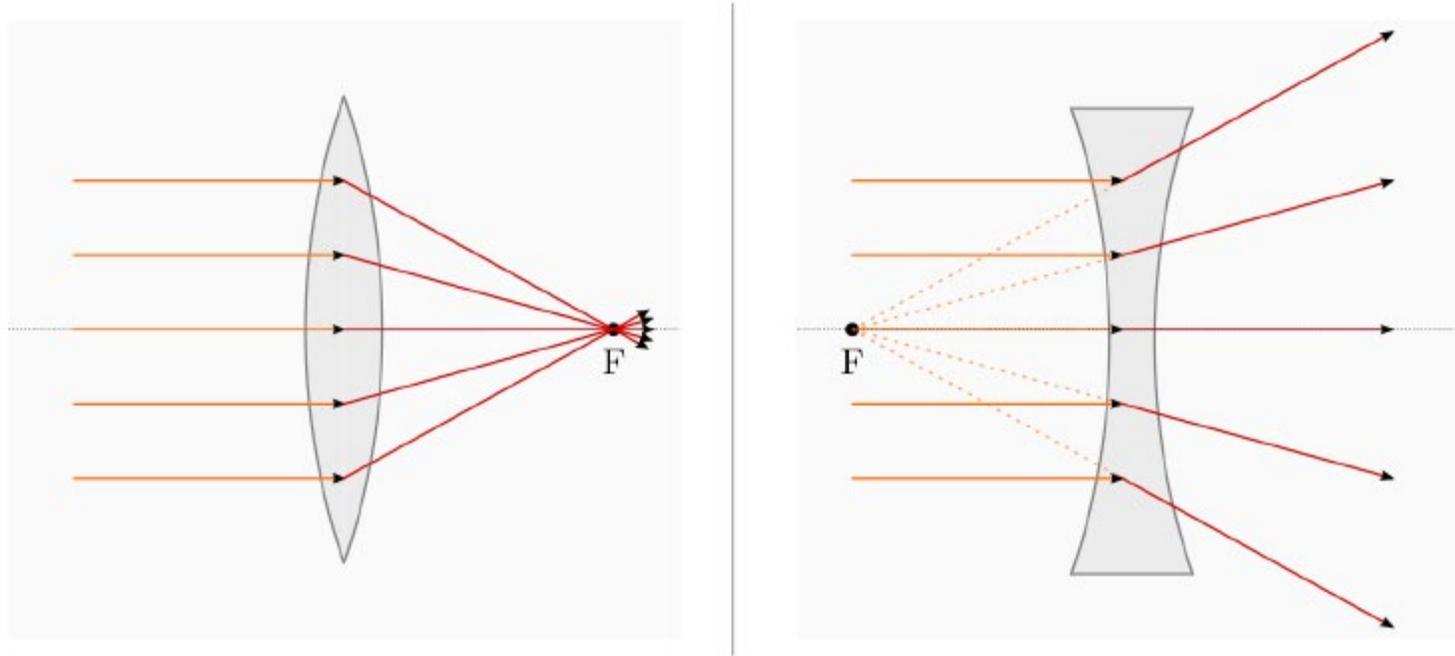
Bei sehr stumpfen Prismen ist sogar eine Totalreflexion des einfallenden Lichts an dem Lichtstrahl gegenüber liegenden Fläche auftreten. Hierbei kann eine Ablenkung des Lichts um 90° bzw. 180° erreicht werden. Derartige „Umkehrprismen“ werden beispielsweise in Fernrohre oder Fotokameras eingebaut, um eine Umlenkung bzw. Vertauschung parallel einfallender Strahlen zu erreichen.

Optische Linsen

Geschliffene Gläser können einfallende Lichtstrahlen – je nach Bauform – bündeln oder zerstreuen. Solche glasartigen Körper, die meist kreisförmig sind und eine bestimmte Krümmung aufweisen, werden als „optische Linsen“ bezeichnet. Ein bekanntes Beispiel ist die Lupe, mit deren Hilfe man ein vergrößertes Bild eines Gegenstandes erhalten kann.



Optische Linsen



Sammellinse (linkes Bild) und Zerstreuungslinse (rechtes Bild) als typische Formen optischer Linsen.

Optische Linsen

Um die Bildentstehung an einer optischen Linse zu erklären, verwendet man (weitestgehend) die gleichen Begriffe wie bei der Beschreibung von *gekrümmten Spiegeln*:

- Optische Achse:

Die Gerade, die durch die Mitte der Linse verläuft und senkrecht zur Linsenebene steht, heißt optische Achse.

Optische Linsen

- Parallelstrahlen:

Alle Strahlen, die parallel zur optischen Achse auf eine optische Linse treffen, heißen Parallelstrahlen. Sie werden durch die Linse gesammelt beziehungsweise zerstreut und schneiden sich in einem gemeinsamen Punkt hinter bzw. vor der Linse. Dieser Punkt auf der optischen Achse wird Brennpunkt F genannt.

Der Abstand zwischen Linsenmittelpunkt und einem Brennpunkt wird Brennweite f genannt. Die Brennweite einer optischen Linse ist umso größer, desto flacher die Linse ist.

Optische Linsen

- Brennpunktstrahlen:

Alle Strahlen, die durch einen Brennpunkt einer optischen Linse verlaufen, werden durch die Linse so gebrochen, dass sie hinter der Linse parallel zur optischen Achse verlaufen.

Optische Linsen

- Mittelpunktstrahlen:

Strahlen, die durch den Linsenmittelpunkt verlaufen, werden beim Eintritt in das Linsenglas ebenso stark gebrochen wie beim Austritt. Mittelpunktstrahlen werden daher nur leicht parallel verschoben (bei dünnen Linsen kaum erkennbar). In guter Näherung durchlaufen Mittelpunktstrahlen die Linse somit unverändert.

Zeichnet man für einen beliebigen Gegenstandspunkt G zwei oder drei der oben genannten Strahlen ein, so erhält man den passenden Bildpunkt als Schnittpunkt der Strahlen.

Optische Linsen

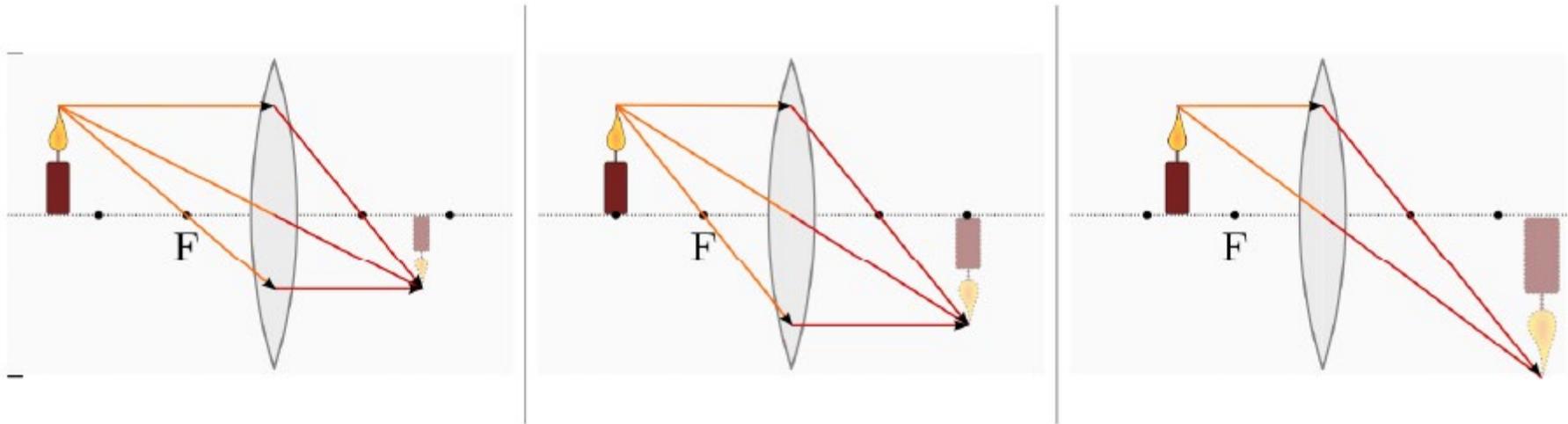
Bildentstehung an einer Sammellinse

Bei der Abbildung eines Gegenstandes durch eine Sammellinse hängen Lage und Größe des Bildes von der Entfernung g des Gegenstands zur Linse und von deren Brennweite f ab.

Nähert man einen Gegenstand einer Sammellinse aus weiter Entfernung, so entfernt sich auch das Bild von der Sammellinse. Sammellinsen erzeugen umgekehrte, seitenvertauschte Bilder von Gegenständen, wenn sich diese außerhalb der Brennweite befinden.

Optische Linsen

Bildentstehung an einer Sammellinse



Bildentstehung an einer Sammellinse (Gegenstand außerhalb der Brennweite).

Optische Linsen

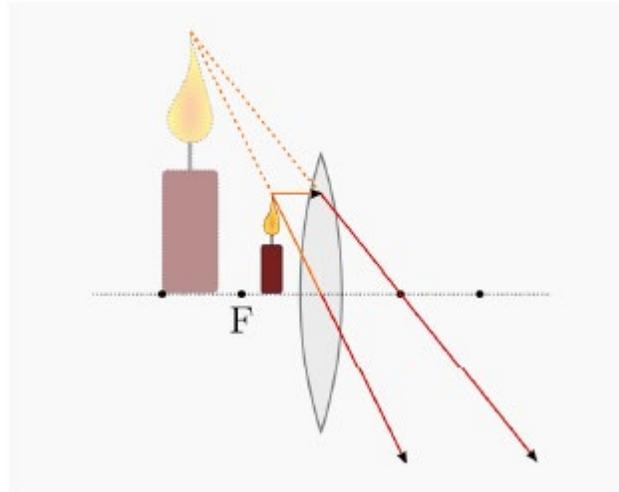
Bildentstehung an einer Sammellinse

Zur Konstruktion des Bildes genügen wiederum die von einem Gegenstandspunkt ausgehenden Brennpunkt- und Parallelstrahlen, die durch die Sammellinse wiederum auf Parallel- bzw. Brennpunktstrahlen abgebildet werden. Der Schnittpunkt der gebrochenen Strahlen entspricht der Lage des Bildes.

Nähert man einen Gegenstand vom Brennpunkt her einer Sammellinse, so nähert sich auch das Bild der Sammellinse. Sammellinsen erzeugen vergrößerte und aufrechte Bilder der Gegenstände, wenn sie sich innerhalb der Brennweite befinden (Lupeneffekt).

Optische Linsen

Bildentstehung an einer Sammellinse



Bildentstehung an einer Sammellinse (Gegenstand innerhalb der Brennweite).

Optische Linsen

Bildentstehung an einer Sammellinse

Zur Konstruktion des Bildes zeichnet man die einem Gegenstandspunkt ausgehenden Bildstrahlen hinter der Sammellinse weiter. Dabei ist zu beachten, dass Brennpunktstrahlen zu Parallelstrahlen werden und Mittelpunktstrahlen stets senkrecht auf die Linse treffen und diese somit ohne Lichtbrechung durchlaufen. Die Lage des Bildes entspricht dem Schnittpunkt der so verlängerten Parallel- bzw. Mittelpunktstrahlen hinter dem Gegenstand.

Aufgrund ihrer vergrößernden Wirkung werden flache Sammellinsen (mit einer großen Brennweite) unter anderem als Lupen und Objektive verwendet.

Linsensysteme

Häufig wird in optischen Geräten nicht nur eine einzelne, sondern vielmehr eine Kombination mehrerer Sammell- beziehungsweise Zerstreuungslinsen genutzt. Einige wichtige Eigenschaften, die sich bei derartigen Anordnungen auftretten, werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

Linsensysteme

Brennweite und Brechkraft eines Linsensystems

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

$$\frac{1}{f_{\text{ges}}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots$$

Die Brennweiten von Sammellinsen werden dabei positiv, die von Zerstreuungslinsen negativ gezählt.

Linsensysteme

Brennweite und Brechkraft eines Linsensystems

Beispiele:

- Eine Kombination zweier Sammellinsen mit den Brennweiten $f_1 = 10 \text{ cm}$ und $f_2 = 15 \text{ cm}$ hat insgesamt folgende Brennweite:

$$\frac{1}{f_{\text{ges}}} = \frac{1}{0,1 \text{ m}} + \frac{1}{0,15 \text{ m}} \quad \Leftrightarrow \quad f_{\text{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{0,1 \text{ m}} + \frac{1}{0,15 \text{ m}}} = 0,06 \text{ m}$$

Die beiden Linsen haben zusammen somit die gleiche Brechkraft wie eine einzelne (Sammel-)Linse mit $f = 6 \text{ cm}$ Brennweite.

Linsensysteme

Brennweite und Brechkraft eines Linsensystems

Beispiele:

- Eine Kombination einer Sammellinse mit einer Brennweite von $f_1 = 30 \text{ cm}$ und einer Zerstreuungslinse mit einer Brennweite von $f_2 = -10 \text{ cm}$ hat insgesamt folgende Brennweite:

$$\frac{1}{f_{\text{ges}}} = \frac{1}{0,3 \text{ m}} - \frac{1}{0,1 \text{ m}} \quad \Leftrightarrow \quad f_{\text{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{0,3 \text{ m}} - \frac{1}{0,1 \text{ m}}} = -0,15 \text{ m}$$

Die beiden Linsen haben zusammen somit die gleiche Brechkraft wie eine einzelne (Zerstreuungs-)Linse mit $f = -15 \text{ cm}$ Brennweite.

Linsensysteme

Brennweite und Brechkraft eines Linsensystems

Kombiniert man eine Sammellinse mit einer Zerstreuungslinse (betragsweise) gleicher Brennweite, so ergibt sich $\frac{1}{f} = 0$ beziehungsweise $f = \infty$. Ein solches System hat eine unendliche Brennweite, d.h. einfallende Lichtstrahlen werden durch diese Linsenkombination quasi nicht gebrochen, sondern durchlaufen es ohne Ablenkung.

Die Brennweiten von Linsen lassen sich, wie im letzten Abschnitt gezeigt, nicht direkt addieren, sondern nur ihre Brennweite. Aus diesem Grund wurde als physikalische Größe die so genannte Brechkraft D eingeführt, die als Kehrwert der Brennweite f definiert ist:

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

Linsensysteme

Brennweite und Brechkraft eines Linsensystems

Die Brechkraft einer Linse wird in Dioptrien (dpt) angegeben. Eine Dioptrie entspricht der Brechkraft einer Sammellinse, die eine Brennweite von einem Meter hat:

$$1 \text{ dpt} = 1 \frac{1}{\text{m}}$$

Je kleiner die Brennweite einer Linse ist, desto größer ist ihre Brechkraft und somit auch ihre Dioptrienzahl; beispielsweise entspricht eine Brennweite von $\frac{1}{2}$ m einer Brechkraft von 2 dpt oder eine Brennweite von $\frac{1}{4}$ m einer Brechkraft von 4 dpt.

Linsensysteme

Brennweite und Brechkraft eines Linsensystems

Die Dioptrienzahl D_{ges} eines Linsensystems ist gleich der Summe der Dioptrienzahlen der einzelnen Linsen; die Brechkraft von Sammellinsen erhält dabei wiederum ein positives, die von Zerstreuungslinsen ein negatives Vorzeichen. Es gilt also:

$$D_{\text{ges}} = D_1 + D_2 + \dots$$

Linsensysteme

Linsenfehler und Abhilfen

Die Brechkraft einer Sammellinse beziehungsweise Zerstreuungslinse wird üblicherweise für Lichtstrahlen angegeben, die nahe der optischen Achse auf die Linse treffen. Strahlen, die auf den Randbereich der Linse treffen („Randstrahlen“), werden stärker gebrochen. Einfallende Parallelstrahlen durchlaufen also keine gemeinsamen Brennpunkt und können somit durch die Linse nicht gemeinsam mit den achsennah einfallenden Strahlen in einem einzigen Punkt scharf abgebildet werden. Es gilt:

$$f_{\text{Rand}} < f_{\text{Mitte}}$$

Linsensysteme

Linsenfehler und Abhilfen

Die Verschiebung des Brennpunkts bei Randstrahlen wird als sphärische Aberration bezeichnet. Um diesen Linsenfehler zu verhindern, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

- Durch eine Blende kann verhindert werden, dass Lichtstrahlen auf den Rand der Linse treffen. Hierdurch werden jedoch der Bildausschnitt und die einfallende Lichtstärke reduziert.
- Durch eine Kombination einer Sammell- und einer Zerstreuungslinse mit unterschiedlichen Brechkraften kann gemäß Gleichung (109) ein Linsensystem mit der gewünschten Brechkraft erzeugt werden, das zugleich die sphärische Aberration (nahezu) auf Null reduziert. Derartige Linsensysteme werden beispielsweise in Objektiven von Fotokameras eingesetzt.

Linsensysteme

Linsenfehler und Abhilfen

Ein weiterer Linsenfehler entsteht dadurch, dass verschieden farbiges Licht beim Durchgang durch die Linse ungleich stark gebrochen wird; in der Regel wird rotes Licht am schwächsten, violetteres Licht am stärksten gebrochen. Dieser Effekt wird als chromatische Aberration bezeichnet. Es gilt:

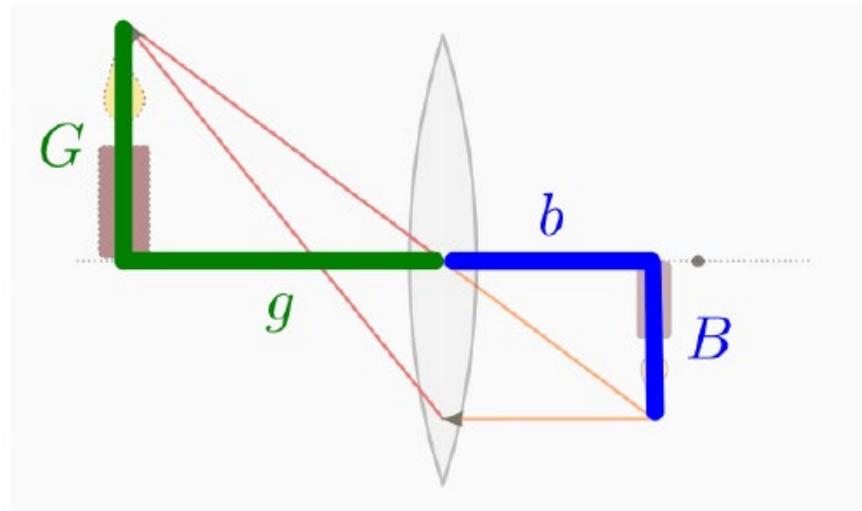
$$f_{\text{violett}} < f_{\text{rot}}$$

Im Gegensatz zur sphärischen chromatische Aberration kann die chromatische Aberration nie vollständig durch geschickte Linsen-Kombinationen beseitigt werden.

Linsensysteme

Das Abbildungsmaß und die Linsengleichung

Das vergrößerte beziehungsweise verkleinerte Bild, das sich bei einer Abbildung durch eine optische Linse ergibt, kann nicht nur durch geometrische Konstruktion sondern auch rechnerisch bestimmt werden.



Herleitung der Abbildungsgleichung (Strahlensatz).

Linsensysteme

Das Abbildungsmaß und die Linsengleichung

Wendet man den 2. Strahlensatz auf die obige Abbildung an, so erkennt man, dass die Größe G des Gegenstands im gleichen Verhältnis zur Entfernung g des Gegenstands von der Linse steht wie die Größe des Bildes B zu seiner Entfernung b von der Linse:

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

Linsensysteme

Das Abbildungsmaß und die Linsengleichung

Formt man diese für Sammel- wie für Zerstreuungslinsen gleichermaßen gültige Gleichung um, so erhält man den Maßstab $\tilde{\beta}$, der sich bei der Abbildung durch die Linse ergibt:

$$\tilde{\beta} = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

Linsensysteme

Das Abbildungsmaß und die Linsengleichung

Formt man diese für Sammel- wie für Zerstreuungslinsen gleichermaßen gültige Gleichung um, so erhält man den Maßstab $\tilde{\beta}$, der sich bei der Abbildung durch die Linse ergibt:

$$\tilde{\beta} = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

Linsensysteme

Das Abbildungsmaß und die Linsengleichung

Der Abbildungsmaßstab $\tilde{\beta}$ hat keine Einheit, sondern ist ein reines Zahlenverhältnis. Sein Wert ist kleiner als Eins im Fall einer Verkleinerung und größer als Eins im Fall einer Vergrößerung.

Häufig lassen sich im praktischen Anwendungsfall die Gegenstandsgröße G sowie die Gegenstandsweite g durch eine gewöhnliche Längenmessung ermitteln. Um damit jedoch auf die Bildgröße B und die Bildweite b schließen zu können, ist neben der eine zusätzliche Gleichung nötig.

Linsensysteme

Das Abbildungsmaß und die Linsengleichung

Wendet man den 2. Strahlensatz auf die obige Abbildung an, so erkennt man, dass die Größe G des Gegenstands im gleichen Verhältnis zur Größe B des Bildes steht wie die Entfernung $g - f$ des Gegenstands vom Brennpunkt zur Brennweite f der Linse:

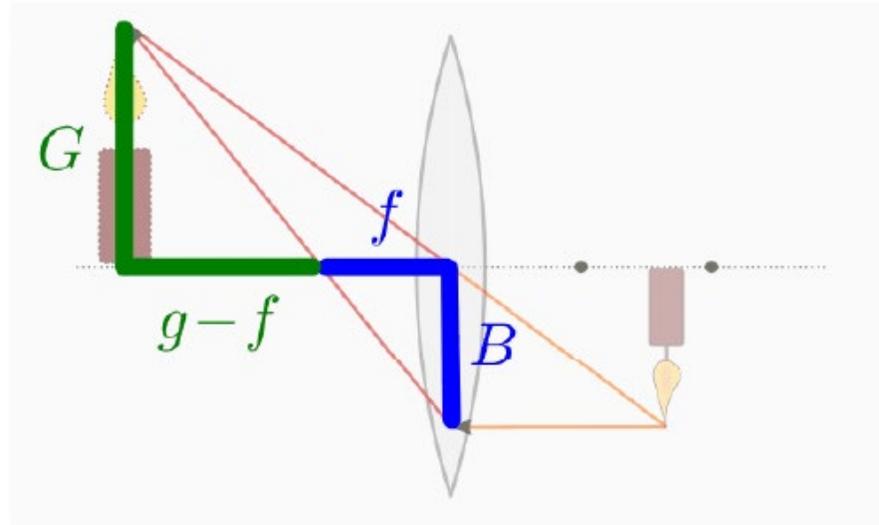
$$\frac{G}{B} = \frac{g - f}{f}$$

Die rechte Seite dieser Gleichung kann in zwei Terme aufgeteilt werden:

$$\frac{G}{B} = \frac{g - f}{f} = \frac{g}{f} - 1$$

Linsensysteme

Das Abbildungsmaß und die Linsengleichung



Herleitung der Linsengleichung (Strahlensatz).

Linsensysteme

Das Abbildungsmaß und die Linsengleichung

Das Verhältnis $\frac{G}{B}$ der Gegenstands- zur Bildgröße ist mit dem Verhältnis $\frac{g}{b}$ der Gegenstands- zur Bildweite identisch. Somit gilt:

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

Dividiert man diese Gleichung durch g und sortiert die Terme, so erhält man die so genannte „Linsengleichung“, die üblicherweise in folgender Form angegeben wird:

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

Linsensysteme

Weit- und Kurzsichtigkeit

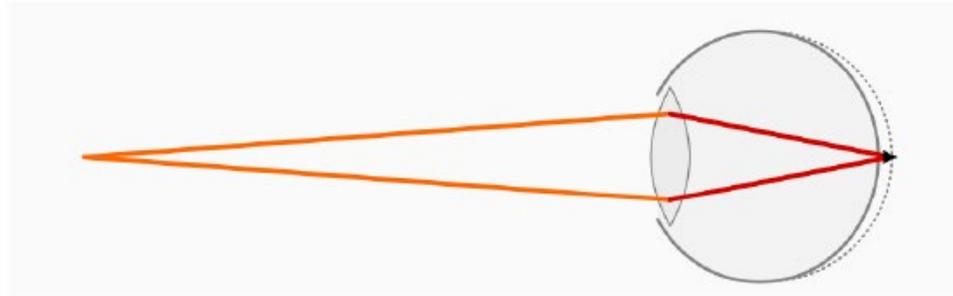
Zu den häufigsten Sehfehlern zählen die so genannte Weit- beziehungsweise Kurzsichtigkeit.

- Bei der Weitsichtigkeit ist der Augapfel „zu klein“, das von der Augenlinse erzeugte Bild liegt also hinter der Netzhaut. In diesem Fall kann eine geeignete Sammellinse Abhilfe schaffen, welche die Brechkraft des sich ergebenden Linsensystems erhöht beziehungsweise seine Brennweite reduziert.

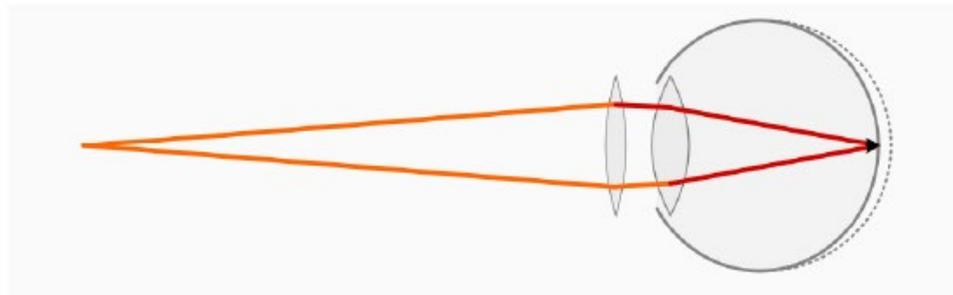
Linsensysteme

Weit- und Kurzsichtigkeit

Ohne
Sehhilfe:



Mit
Sehhilfe:



Weitsichtigkeit ohne und mit Sehhilfe.

Linsensysteme

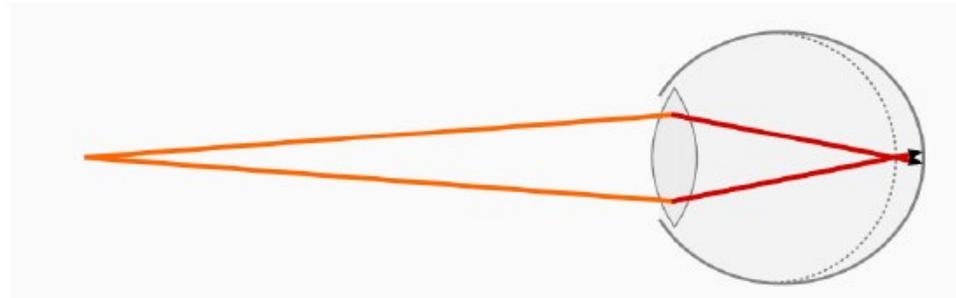
Weit- und Kurzsichtigkeit

- Bei der Kurzsichtigkeit ist der Augapfel „zu groß“, das von der Augenlinse erzeugte Bild liegt also vor der Netzhaut. In diesem Fall kann eine geeignete Zerstreuungslinse Abhilfe schaffen, welche die Brechkraft des sich ergebenden Linsensystems herabsetzt beziehungsweise seine Brennweite erhöht.

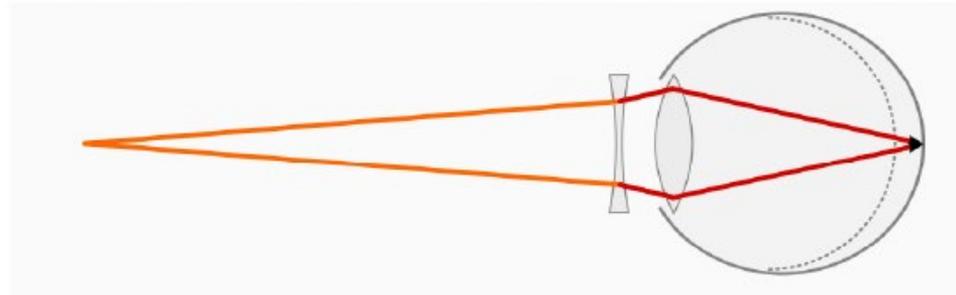
Linsensysteme

Weit- und Kurzsichtigkeit

Ohne
Sehhilfe:



Mit
Sehhilfe:



Kurzsichtigkeit ohne und mit Sehhilfe.

Linsensysteme

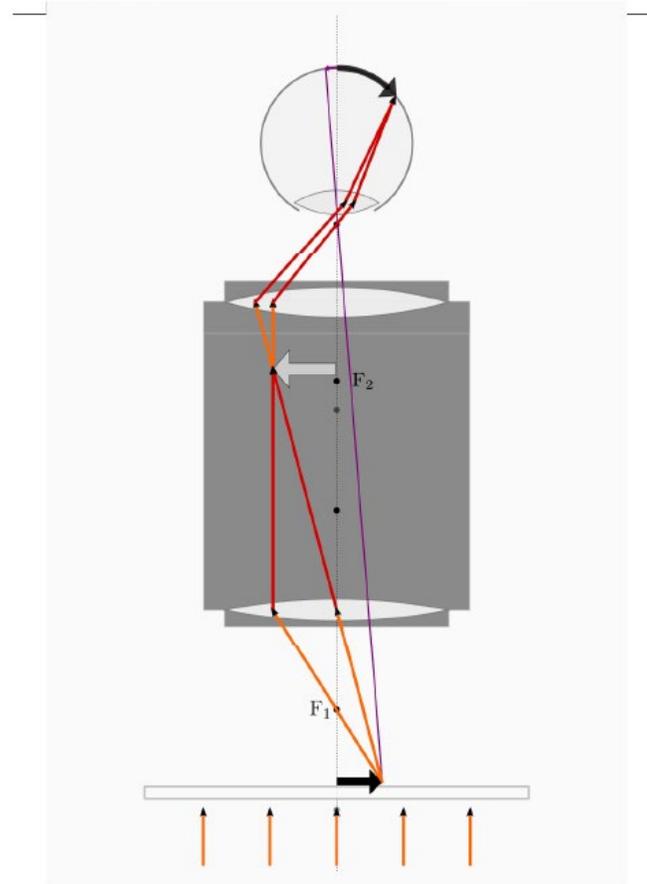
Das Lichtmikroskop

Bei einem Lichtmikroskop wird mittels einer starken Lichtquelle, die sich im Sockel des Mikroskops befindet, ein auf einem Mikroskoptisch liegendes Präparat durchleuchtet. Dieser Gegenstand wird durch ein System aus zwei Sammellinsen (Objektiv und Okular) betrachtet.

Die Entfernung des betrachteten Gegenstands zum Objektiv wird durch eine Höhenverstellung des Mikroskoptischs so eingestellt, dass die Entfernung des Gegenstands zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite des Objektivs liegt. Das Objektiv erzeugt in diesem Fall ein vergrößertes, umgekehrtes und seitenvertauschtes Bild des Gegenstands innerhalb des Tubus.

Linsensysteme

Das Lichtmikroskop



Strahlengang in einem Lichtmikroskop.

Wellenoptik

Unter bestimmten Bedingungen zeigt Licht Welleneigenschaften, die mit dem vereinfachten Modell von „Lichtstrahlen“ nicht erklärbar sind. Um beispielsweise auch Farbspektren, Interferenz- und Polarisationserscheinungen beschreiben zu können, geht man in der „modernen“ Optik von einem Wellenmodell des Lichts aus.

Wellenoptik

Lichtbeugung und Interferenz

Wird Licht durch die Öffnung einer Blende so begrenzt, dass nur ein schmales Lichtbündel die Blende passieren kann, so dürfte gemäß der Strahlenoptik kein Licht außerhalb dieses Bündels auftreten. Tatsächlich weicht die Ausbreitungsrichtung des Lichts allerdings vom geradlinigen Verlauf ab, so dass an nahezu allen Stellen hinter der Blende eine gewisse Menge an Licht anzutreffen ist. Man sagt, dass Licht, ähnlich wie eine Wasserwelle, an den Kanten eines Hindernisses „gebeugt“ wird.

Wellenoptik

Huygenssches Prinzip

Im Jahr 1678 veröffentlichte **Christian Huygens** ein Buch zur Wellentheorie des Lichts. Darin beschrieb er unter anderem das heute nach ihm benannte Prinzip der Elementarwellen:

Jeder Punkt einer Wellenfront stellt selbst wiederum einen Ausgangspunkt für eine neue, kreisförmig in alle Richtungen verlaufende Welle dar. Die einzelnen Wellen überlagern sich dabei zur nächsten Wellenfront.

Die Senkrechte auf den Wellenfronten entspricht der Ausbreitungsrichtung der Welle.

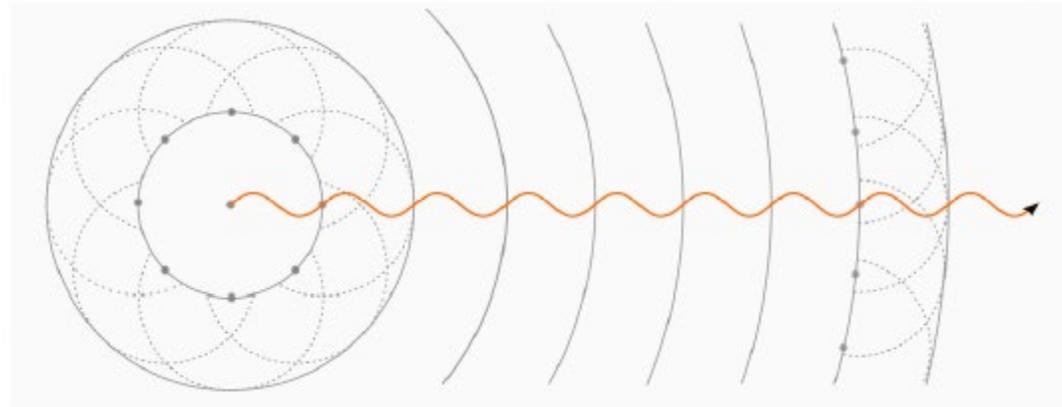
Wellenoptik

Huygensches Prinzip

Das Huygen'sche Prinzip besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer Elementarwelle angesehen kann. Diese breiten sich aufgrund von Beugung in den geometrischen Schattenraum aus. Viele Elementarwellen bilden neue Wellenfronten.

Wellenoptik

Huygenssches Prinzip



Lichtwelle und Wellenfronten nach dem Huygenschen Prinzip

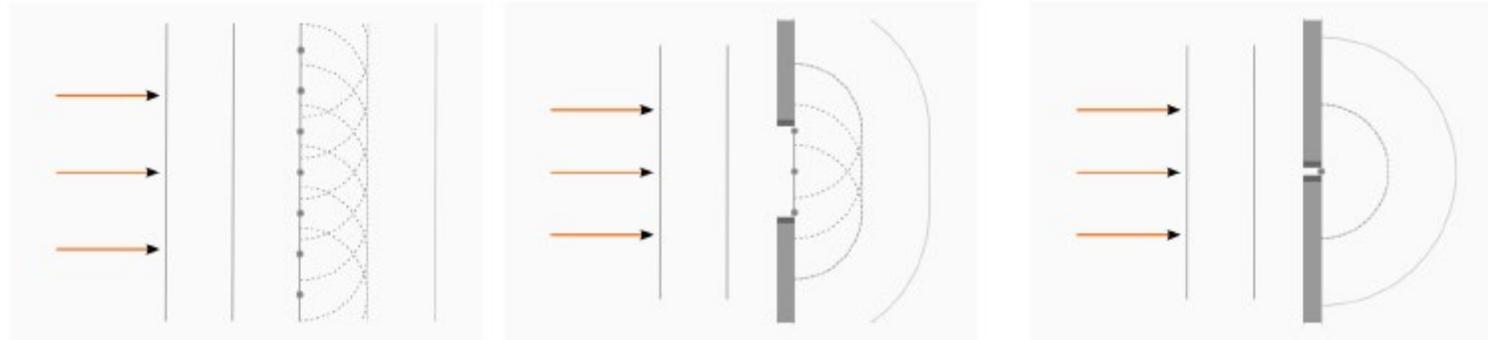
Wellenoptik

Huygensches Prinzip

Unter einer Wellenfront versteht man die Menge aller Punkte, die zu einem bestimmten Zeitpunkt eine gleiche Phasenlage aufweisen, also beispielsweise zu einem bestimmten Zeitpunkt einen Wellenberg darstellen. Das Huygensche Prinzip kann also als eine Art geometrische Konstruktionshilfe aufgefasst werden, die beispielsweise zum Zeichnen der Ausbreitung einer Welle genutzt werden kann. Ist eine gleichmäßig verlaufende Welle weit vom ursprünglichen Erregerzentrum entfernt, so verlaufen die Wellenfronten beziehungsweise die Ausbreitungsrichtungen nahezu geradlinig und parallel.

Wellenoptik

Huygenssches Prinzip



Beugungsmuster von Lichtwellen.

Wellenoptik

Huygenssches Prinzip

Trifft eine Wellenfront hingegen auf ein (nicht zu kleines) Hindernis, beispielsweise den Rand einer Blende, so tritt eine Beugung des Lichts auf. Das Licht kann sich dabei auch in Bereiche hinein ausbreiten, die nach der Strahlentheorie dunkle „Schattenräume“ darstellen würden. Wohl am deutlichsten zeigt sich diese Eigenschaft an einem dünnen Spalt, dessen Breite in etwa so groß wie die Wellenlänge der eintreffenden Wellen ist. In diesem Fall entstehen hinter der Öffnung erneut kreisförmig verlaufende Wellen, welche die Spaltöffnung der Blende als gemeinsames Zentrum haben.¹

¹ Streng genommen ist dieses Modell, dass hinter einem sehr dünnen Spalt *ein* kreisförmiges Wellenzentrum entsteht, falsch. Tatsächlich gelangen durch jeden noch so dünnen Spalt mehrere Wellen parallel hindurch, die ebenfalls untereinander die Interferenz-Erscheinungen zeigen. Die Vorstellung ist dennoch ein hilfreiches Modell für die Erklärungen der Interferenzen am Doppelspalt und an optischen Gittern.

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Kommt es zur **Überlagerung** von zweier oder mehrerer Wellen nach dem Superpositionsprinzip, so nennt man dies Interferenz. Unter Superposition, auch Superpositionsprinzip (von lateinisch super = über; positio = Lage, Setzung, Stellung) versteht man in der Physik eine **Überlagerung** gleicher physikalischer Größen. Damit die bei der Interferenz entstehende neue Welle stabil ist, also eine zeitlich konstante Amplitude, Wellenlänge, Geschwindigkeit und Frequenz hat, müssen die beiden interferierenden Wellen **kohärent** sein. Man unterscheidet zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz.

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Hat eine Blende zwei schmale, im Abstand s_D voneinander entfernte Öffnungen, so teilt sich eine einfallende Lichtwelle hinter der Blende in zwei kreisförmige, von den beiden Öffnungen aus verlaufende Wellen auf. Diese Wellen überlagern sich, so dass es an bestimmten Stellen zu konstruktiver, an anderen Stellen zu destruktiver Interferenz kommt. Bestrahlt man den Doppelspalt beispielsweise mit einem Laser und bringt in einigen Metern hinter der Blende einen optischen Schirm an, so lässt sich auf diesem ein hell-dunkles Streifenmuster in der Farbe des Lasers erkennen.

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Um dieses Interferenzmuster erklären zu können, muss die Phasenlage der beiden vom Spalt ausgehenden Lichtwellen betrachtet werden. An ihren Ausgangspunkten haben beide die gleiche Phase, da eine aus weiter Entfernung senkrecht eintreffende Lichtwelle beide Spalte gleichzeitig erreicht. Bei einfarbigem Licht weisen beide Wellen zudem eine gleiche Wellenlänge λ auf. Der einzige Unterschied zwischen beiden Wellen liegt somit darin, dass sie von zwei unterschiedlichen Zentren ausgehen und daher, von einem Blickwinkel α aus gesehen, einen so genannten „Gangunterschied“ Δs aufweisen. Damit ist gemeint, dass eine der beiden Wellen zu Beginn ihrer Ausbreitung eine um Δs längere Wegstrecke zurücklegen muss.

Wellenoptik

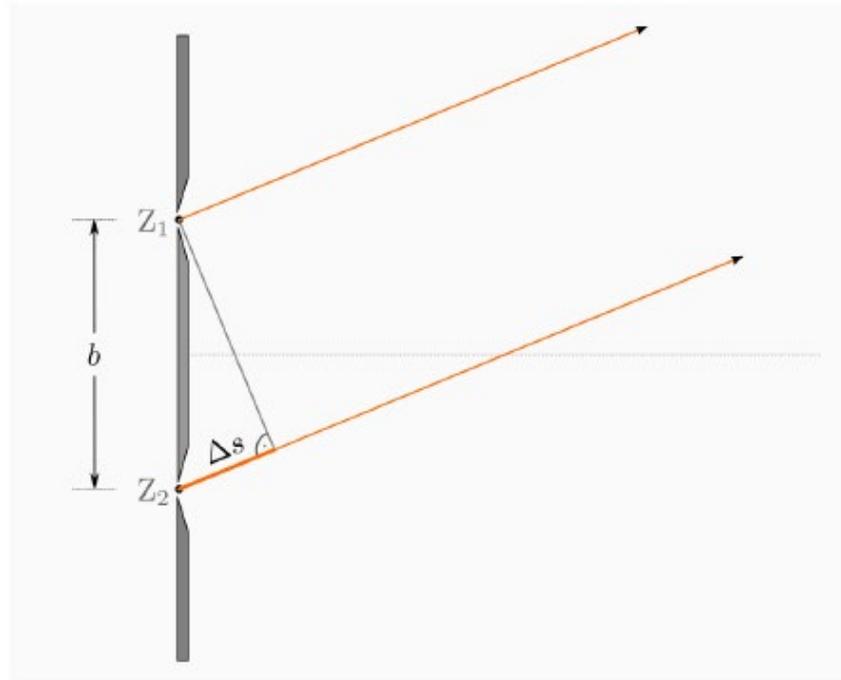
Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Ist der Gangunterschied Δs gleich einer ganzen Wellenlänge λ , so verlaufen die Lichtwellen anschließend in stets gleicher Phase, es tritt also konstruktive Interferenz auf. Die Bedingung für ein Intensitätsmaximum ist ebenso erfüllt, wenn der Gangunterschied Δs ein ganzzahliges Vielfaches $k = 1, 2, 3, \dots$ der Wellenlänge λ beträgt:

$$\Delta s = k \cdot \lambda$$

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt



Lichtbeugung und Interferenz am Doppelspalt.

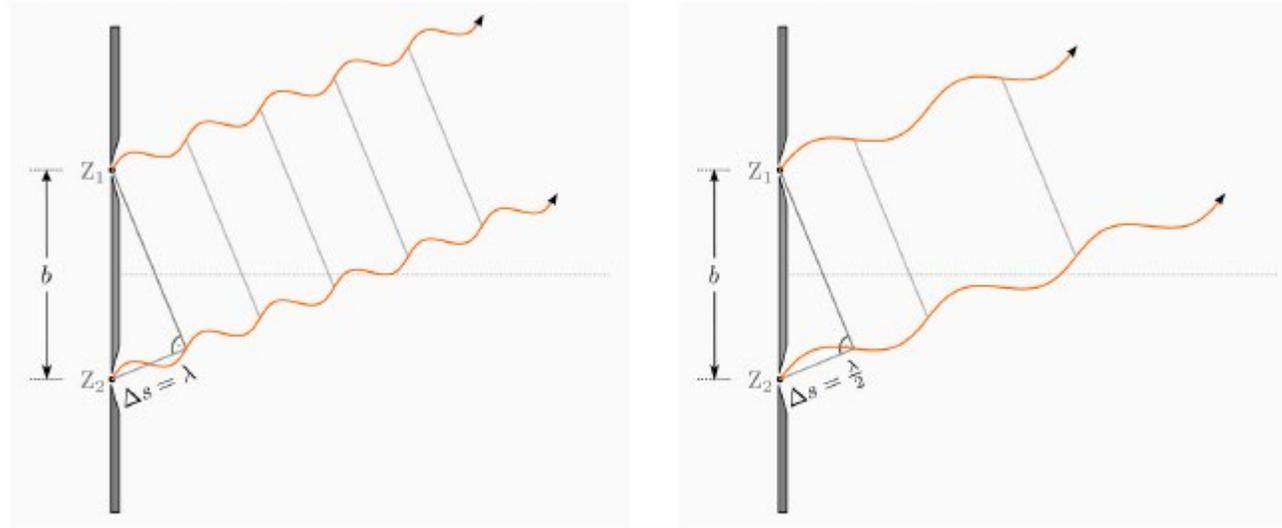
Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Entlang der Mittellinie tritt (für beliebige Wellenlängen) an allen Stellen konstruktive Interferenz ein, da alle Punkte auf dieser Linie von beiden Spaltöffnungen gleich weit entfernt sind, der Gangunterschied für beide Wellen somit gleich Null ist. Das zugehörige Helligkeitsmaximum wird auch als „nulltes Maximum“ bezeichnet, da es dem Gangunterschied $\Delta s = 0 \cdot \lambda$ entspricht.

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt



Konstruktive und destruktive Interferenz am Doppelspalt in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Die konstruktive Interferenz tritt auf, wenn die Wellenberge der einen Welle genau auf die Wellenberge der anderen Welle treffen. Dabei verstärken sich die beiden Wellen und es entsteht eine Welle mit einer größeren Amplitude, die sich aus der Addierung der beiden Amplituden der beiden Wellen ergibt. Konstruktive Interferenz entsteht bei einem geraden Vielfachen der Phasendifferenz $\Delta\varphi$, also $0\pi, 2\pi, 4\pi$ usw. Der Gangunterschied δ muss ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge λ betragen ($1\lambda, 2\lambda, 3\dots$). Allgemein schreibt man also: $k \cdot \lambda$ oder $k \cdot 2\pi$.

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Die destruktive Interferenz tritt auf, wenn die Wellenberge der einen Welle genau auf die Wellentäler der anderen Welle treffen. Dadurch entsteht eine Welle mit einer kleineren der Amplitude. Wenn die beiden Wellen die gleiche Amplitude haben löschen sie sich gegenseitig aus und es entsteht eine Welle mit der einer Amplitude von 0, da sich beide Amplituden der beiden Wellen aufheben. Destruktive Interferenz entsteht bei einem ungeraden Vielfachen der Phasendifferenz $\Delta\varphi$, also $\pi, 3\pi, 5\pi$ usw. Der Gangunterschied δ muss ein halbes Vielfaches der Wellenlänge λ sein betragen ($\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2} \dots$). Allgemein schreibt man also: $\frac{(2k-1)\cdot\lambda}{2}$ oder $k \cdot \pi$ mit ungeradem k .

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Ist der Gangunterschied Δs hingegen gleich der Hälfte der Wellenlänge λ (oder einem ungeradzahligen Vielfachen), so verlaufen die Lichtwellen anschließend in Gegenphase, es tritt also destruktive Interferenz auf.

Wie weit die hellen und dunklen Streifen auf dem Schirm auseinander liegen bzw. unter welchen Winkeln α_k sie erscheinen, ist somit von der Wellenlänge λ abhängig. Bezüglich des Winkels α_k gelten zudem folgende geometrische Beziehungen:

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

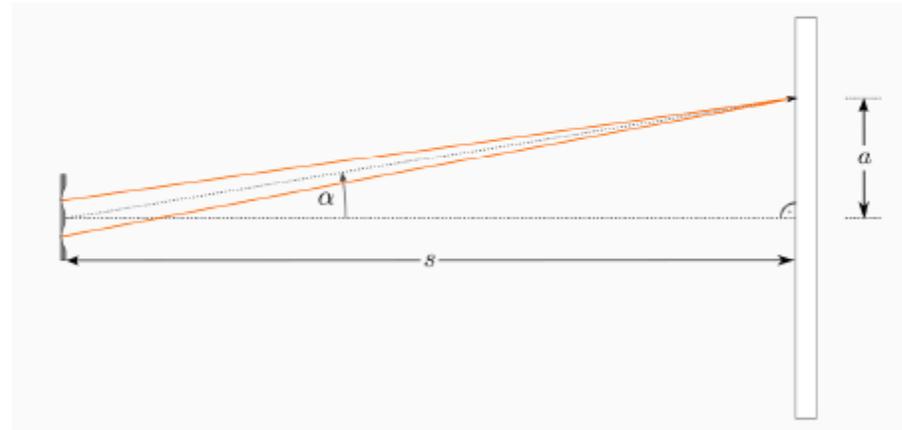
- Der Abstand $s \approx 5 \text{ m}$ zwischen dem Doppelspalt und dem Schirm ist sehr viel größer als der Abstand $b \approx 0,1 \text{ mm}$ der beiden Spaltöffnungen voneinander; vom Schirm aus gesehen erscheinen beide Spaltöffnungen in sehr guter Näherung unter dem gleichen Winkel α . Somit gilt:

$$\tan \alpha = \frac{a}{s}$$

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Dabei bezeichnet a den Abstand des auf dem Schirm betrachteten Maximums von der Mittellinie.



Wellenoptik

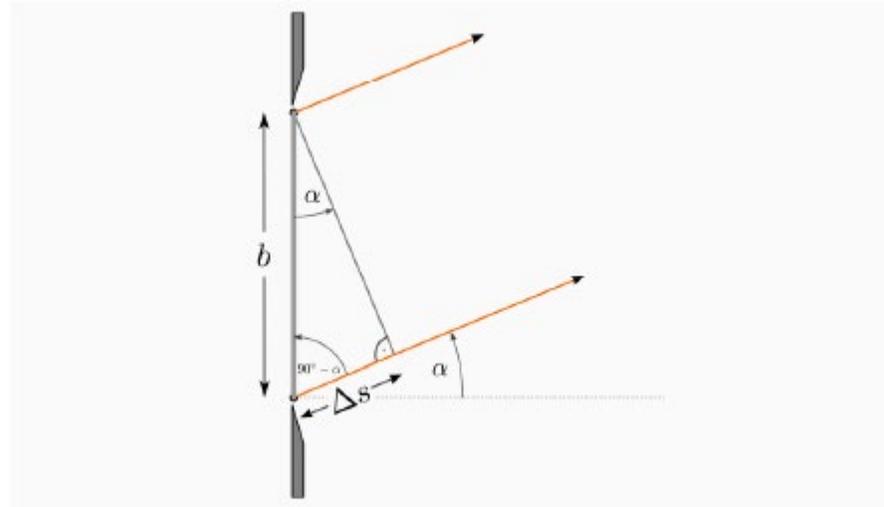
Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

- Betrachtet man in der obigen Abbildung das an den beiden Spaltöffnungen anliegende, rechtwinklige Dreieck, so kann man folgenden Zusammenhang zwischen dem Winkel α , dem Spaltabstand b und dem Gangunterschied Δs erkennen:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta s}{b}$$

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt



Struktureller Zusammenhang zwischen dem Betrachtungswinkel α , dem Gangunterschied Δs und dem Doppelspaltabstand b .

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Da der Winkel α bei fast allen Doppelspalt-Versuchen sehr klein ist ($\alpha < 5^\circ$), kann in sehr guter Näherung folgende Kleinwinkelnäherung verwendet werden:

$$\sin(\alpha) = \frac{\sin(\alpha)}{1} \approx \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \tan(\alpha)$$

Mit dieser Näherung für kleine Winkel lassen sich die obigen Zusammenhänge und die Bedingung (116) für Intensitätsmaxima zu einer einzigen Formel zusammenfassen:

$$\Delta s = \frac{a \cdot b}{s} = k \cdot \lambda$$

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

beziehungsweise, wenn man die Wellenlänge des Lichts bestimmen möchte:²

$$\lambda = \frac{a \cdot b}{k \cdot s} \quad (117)$$

Ist der Doppelspalt-Abstand b bekannt, so kann man also mittels einer einfachen Messung der Entfernung s zwischen Doppelspalt und Schirm und des Abstands a eines frei wählbaren Maximums $k = 1, 2, 3, \dots$ von der Mittellinie auf dem Schirm unmittelbar die Wellenlänge des Lichts berechnet werden.

² Auf diese Weise bestimmte [Thomas Young](#) im Jahr 1802 erstmals die Wellenlänge eines einfarbigen Lichtstrahls.

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Beispiel:

- Ein Doppelspalt wird mit einem roten Laserstrahl beleuchtet. Bei einem Schirmabstand von $s = 5,00 \text{ m}$ erscheint auf dem Schirm das $k = 3$. Maximum in einem Abstand $a = 0,10 \text{ m}$ von der Mittellinie. Hat die dabei verwendete Blende einen Doppelspaltabstand von $b = 0,1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$, so gilt für die Wellenlänge des Lichts:

$$\lambda = \frac{a \cdot b}{k \cdot s} = \frac{10^{-1} \text{ m} \cdot 10^{-4} \text{ m}}{3 \cdot 5 \text{ m}} \approx 667 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

Die Wellenlänge des roten Laserlichts beträgt somit rund 667 nm.

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Gitter

In der Praxis verwendet man anstelle eines Doppelspalts üblicherweise ein optisches Gitter. Ein solches besteht aus sehr vielen spaltartige Öffnungen, die regelmäßig im geringem Abstand voneinander angeordnet sind. Gute optische Gitter können etwa eine Anzahl von $N = 1000$ Spalten je Millimeter aufweisen. Für den Abstand g zwischen den den lichtdurchlässigen Bereichen gilt somit:

$$g = \frac{1}{N}$$

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Gitter

Der Gitterabstand beträgt für $N = 1000 \frac{1}{\text{mm}} = 1 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{m}}$ genau $g = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, also einen Mikrometer. Diese „Feinheit“ bewirkt, dass die einzelnen Interferenzmaxima um einen größeren Winkel α aufgefächert werden und so auf dem Schirm weniger „verschmieren“. Sie können auf dem Schirm, etwas umgangssprachlich formuliert, in besserer Auflösung betrachtet werden.

Wellenoptik

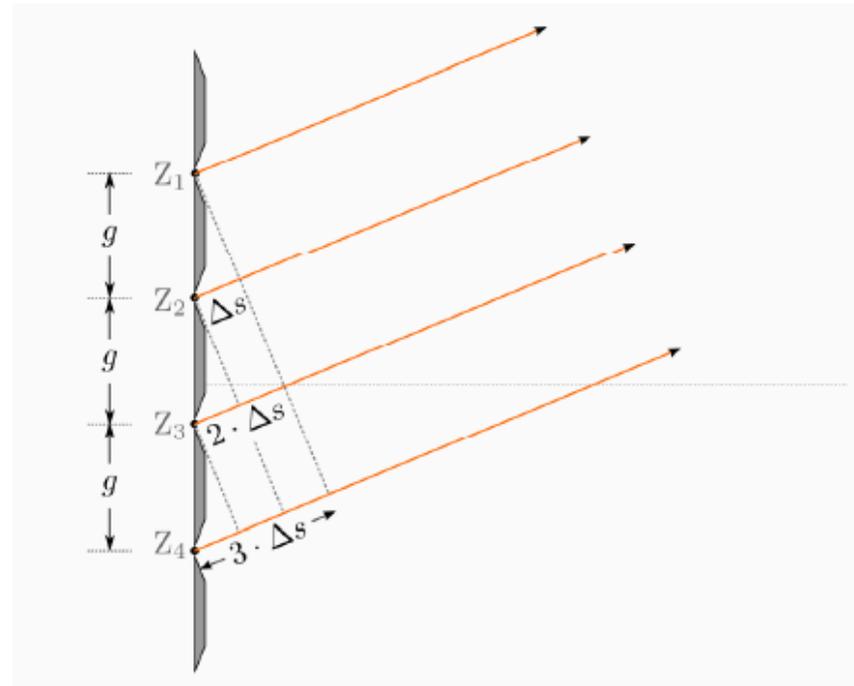
Beugung und Interferenz an einem Gitter

Für die Lichtbeugung an einem optischen Gitter gelten grundsätzlich die gleichen Gesetzmäßigkeiten und Formeln wie bei der Lichtbeugung an einem Doppelspalt; es muss lediglich statt des Doppelspaltsabstands b der Gitterabstand g in die jeweilige Formel eingesetzt werden. Die Wellenlänge eines am Gitter interferierenden, einfarbigen Lichtstrahls kann also – in Analogie zu Gleichung (117) – unmittelbar anhand des Gitterabstands g , dem Abstand s zwischen Gitter und Schirm und dem Abstand a des $k = 1, 2, 3, \dots$ -ten Maximums von der Mittellinie bestimmt werden:

$$\lambda = \frac{a \cdot g}{k \cdot s}$$

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Gitter



Lichtbeugung und Interferenz am optischen Gitter.

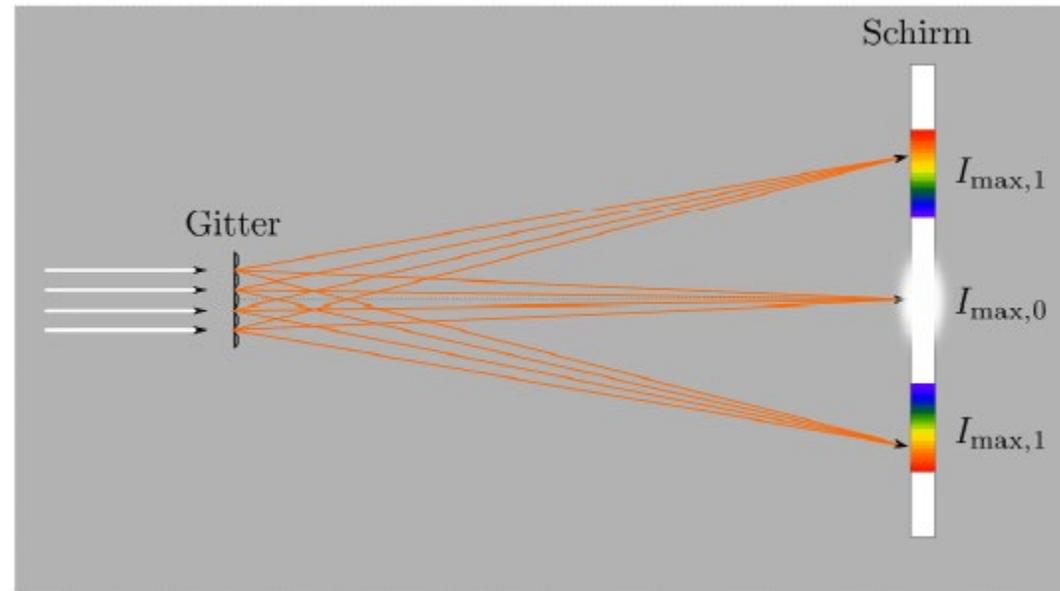
Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Gitter

Verwendet man für Interferenzversuche an einem optischen Gitter *kein* Laserlicht, sondern ein anderes monochromatisches Licht, so muss das auf das Gitter einfallende Lichtstrahl zuvor durch einen einzelnen dünnen Spalt (eine schmale Blende) begrenzt werden. Die Spaltöffnung wirkt in diesem Fall in guter Näherung wie eine einzige punktförmige Lichtquelle, so dass die einzelnen Lichtwellen hinter dem Spalt eine (nahezu) konstante Phasenlage zueinander aufweisen, und somit einzelne Wellen gleicher Wellenlänge jeweils *kohärent* sind. Bei der Verwendung von Lasern kann die spaltartige Blende vor dem Gitter weggelassen werden, da Laser aufgrund ihres besonderen Aufbaus bereits von sich aus kohärentes Licht erzeugen.

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Gitter



Interferenzmaxima am optischen Gitter.

Wellenoptik

Beugung und Interferenz an einem Gitter

Verwendet man weißes Licht als Lichtquelle, das mehrere Farbanteile hat, so fächern sich diese an den Stellen der maximalen Intensitäten auf dem Schirm zu regenbogenartigen Spektren auf; sind manche Wellenlängen in der Lichtquelle nicht enthalten, so bleiben die jeweiligen Stellen im Spektrum dunkel. Nach Gleichung (118) ist die Ablenkung proportional zur Wellenlänge ($a = \frac{k \cdot s}{g} \cdot \lambda$), blaues Licht wird also weniger stark abgelenkt als rotes. Diese Eigenschaft wird beispielsweise zur so genannten Spektralanalyse genutzt.

Wellenoptik

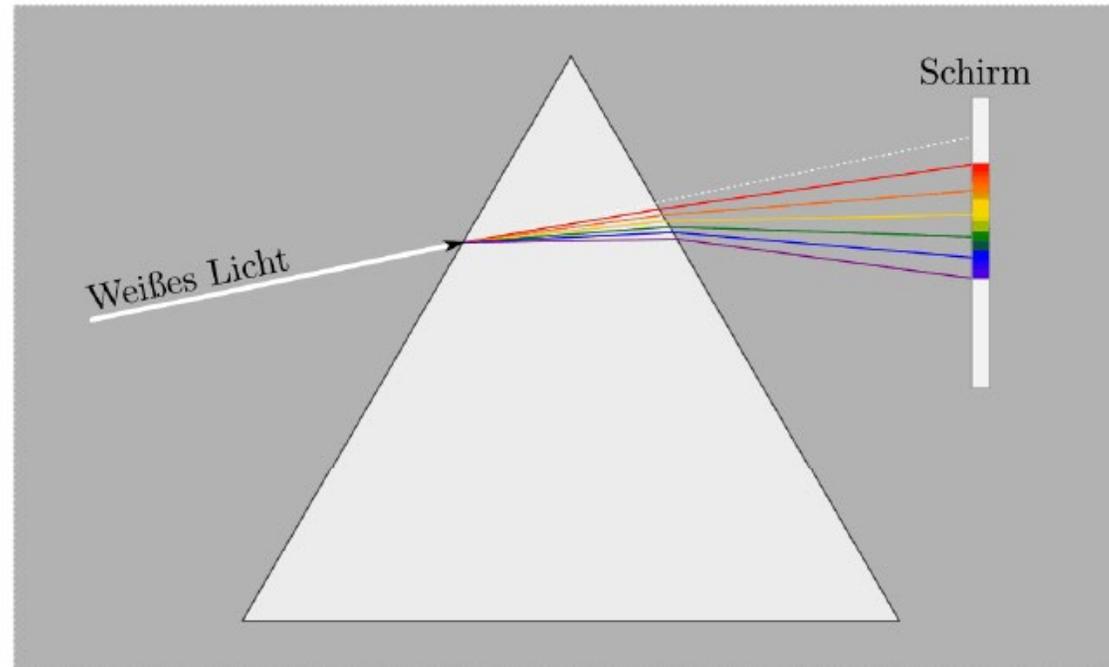
Lichtdispersion

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in einem optischen Medium ist nicht nur von dessen Brechungsindex, sondern auch von der Lichtfrequenz abhängig. Die unterschiedlichen Spektralanteile werden dadurch beispielsweise beim Durchgang durch ein Prisma unterschiedlich stark gebrochen, so dass sich mittels eines Prismas weißes Licht in seine Farbanteile aufteilen lässt.³

³ Das in Abbildung *Lichtdispersion (Prisma)* dargestellte Spektrum soll die Aufgliederung der Farben schematisch verdeutlichen, ist dabei jedoch nicht maßstabsgetreu gezeichnet. In Luft betragen die Wellenlängen für rotes Licht 780 bis 640 nm, für oranges Licht 640 bis 600 nm, für gelbes Licht 600 bis 580 nm, für grünes Licht 580 bis 495 nm, für blaues Licht 495 bis 440 nm und für violettes Licht 440 bis 380 nm.

Wellenoptik

Lichtdispersion



Lichtdispersion bzw. Spektralzerlegung in einem Prisma.

Wellenoptik

Lichtdispersion

Technisch lässt sich dieses Prinzip der Spektralzerlegung auf zwei Arten nutzen:

- Bei einem „Monochromator“ wird anstelle eines Schirms eine Blende mit schmaler Öffnung angebracht. Dadurch wird nur ein schmaler Bereich (quasi eine einzelne Farbe) des Spektrums für weitere Versuchszwecke aus dem Lichtspektrum herausgefiltert.
- Bei einem „ref: *Prismen-Spektrometer* <*Spektrometer*>“ werden die Lichtanteile des Spektrums anhand einer Skala mit den Lichtanteilen bekannter Lichtquellen verglichen. Eine vergleichsweise einfache Kalibrierung wie bei einem optischen Gitter ist jedoch nicht möglich, da die Dispersion nicht linear mit der Lichtfrequenz bzw. der Wellenlänge zusammenhängt.

Wellenoptik

Lichtdispersion

Bei einem Prisma, dessen Funktionsprinzip auf der Dispersion des Lichts beruht, wird blaues Licht stärker von der ursprünglichen Richtung abgelenkt als rotes; genau umgekehrt ist es bei einem optischen Gitter. Ein weiterer Unterschied zwischen diesen beiden Arten der Spektralerzeugung besteht darin, dass ein Prisma im Gegensatz zu einem optischen Gitter nur *ein* Spektrum erzeugt, das allerdings lichtintensiver ist als die einzelnen Gitterspektren.

Zur Spektralanalyse werden im Allgemeinen dennoch bevorzugt Gitter eingesetzt, zum einen aufgrund ihrer leichteren Kalibrierbarkeit, vor allem jedoch aufgrund der größeren Auffächerung bzw. der besseren „Auflösung“ beim Betrachten der einzelnen Spektrallinien.

Wellenlänge

Schall:

Man entfernt sich um eine Strecke a und bestimmt akustisch mit den Ohren die Maxima und markiert die entsprechenden Stellen. Man nehme am besten den Abstand der 0. Ordnung zum 1. Maxima im Abstand d_1 . Damit: $\lambda = \sin[\tan^{-1}(\frac{d_1}{a}) \cdot g]$

Wellenlänge

Schall:

Man entfernt sich um eine Strecke a und bestimmt akustisch mit den Ohren die Maxima und markiert die entsprechenden Stellen. Man nehme am besten den Abstand der 0. Ordnung zum 1. Maxima im Abstand d_1 . Damit: $\lambda = \sin[\tan^{-1}(\frac{d_1}{a}) \cdot g]$

Wellenlänge

Röntgenstrahlung:

Für die Bestimmung der Wellenlänge von Röntgenstrahlen nutzt man die Bragg'sche Reflexionsbedingung (Abschn.5.4). Es gilt:

$$2d \sin \varphi = k\lambda, (k = 1, 2, 3\dots).$$

Man misst mit einem Zählrohr (Geiger-Müller-Zählrohr) die Winkel, unter denen Maxima auftreten und bestimmt so bei bekannter Netzebene d die Wellenlänge.

Photometrie

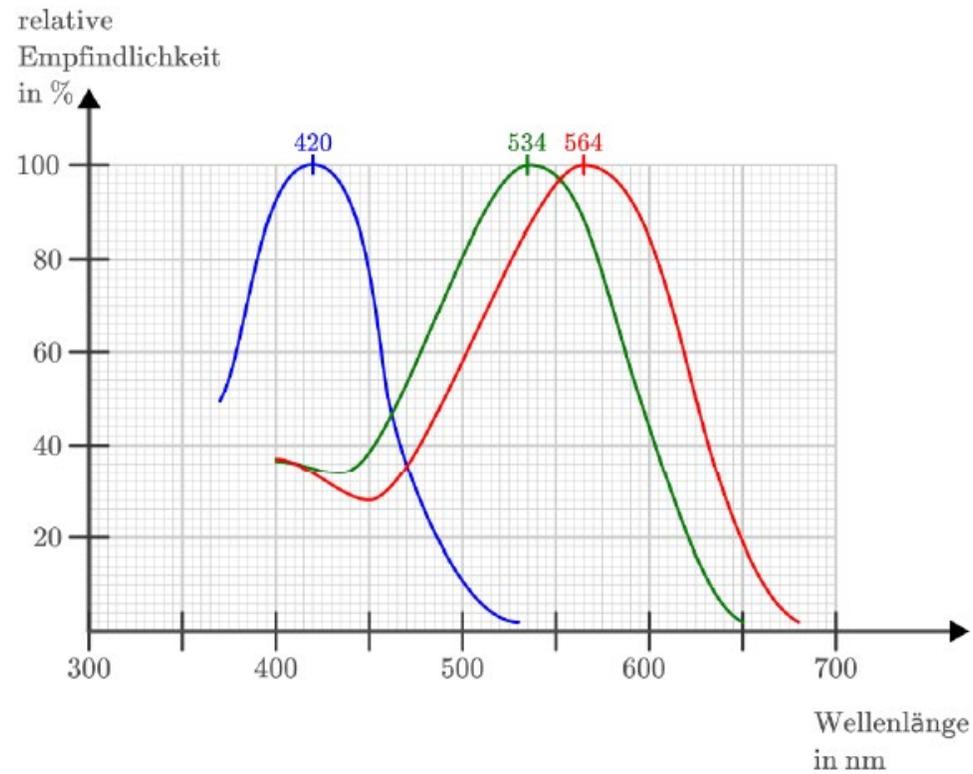
Farbwahrnehmung des Menschen

Die menschliche Farbwahrnehmung beruht auf speziellen Sinneszellen, die sich auf der Netzhaut des Auges befinden. Insgesamt hat ein Mensch rund 125 000 000 so genannte Zäpfchen, die für das Farb-Sehen sorgen, und rund 7 000 000 so genannte Stäbchen, die auf eine Hell-Dunkel-Wahrnehmung ausgerichtet sind.

Bei den Zäpfchen gibt es drei verschiedene Typen, die ihre maximale Empfindlichkeit im roten, grünen oder blauen Farbbereich haben. Jede derartige Sinneszelle hat ihre maximale Empfindlichkeit bei einer bestimmten Wellenlänge, bei größeren oder kleineren Wellenlängen nimmt die Empfindlichkeit stetig ab. Insgesamt umfasst der menschliche Farbwahrnehmungsbereich ein Wellenlängen-Spektrum von ca. 380 nm bis 680 nm.

Photometrie

Farbwahrnehmung des Menschen



Relative Empfindlichkeit der Zäpfchen für blaues, grünes und rotes Licht beim menschlichen Auge.

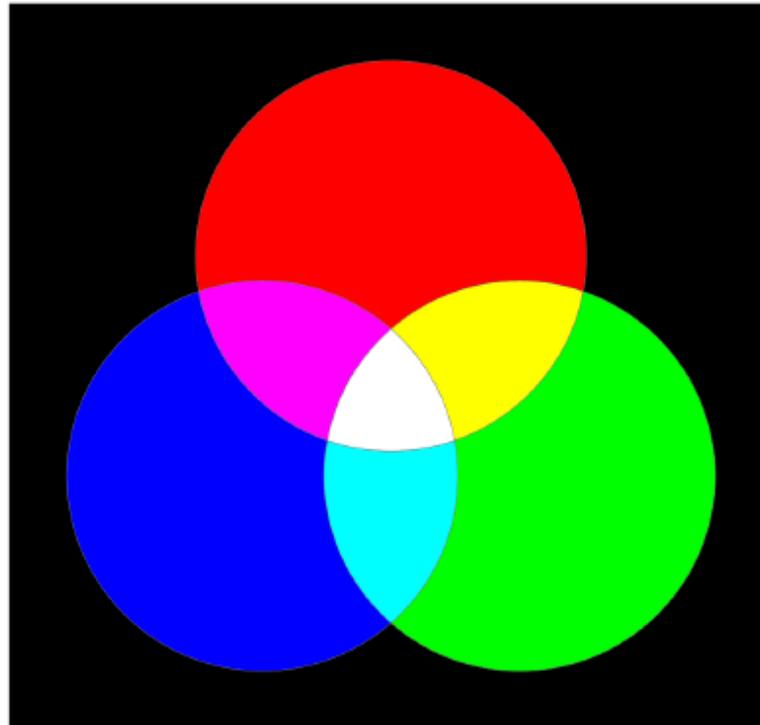
Photometrie

Additive und subtraktive Farbmischung

Das Gehirn kombiniert die einzelnen Sinneseindrücke für rotes, grünes und blaues Licht zu einer wahrgenommenen Gesamtfarbe. Nehmen wir alle drei Farben gleichzeitig wahr, so empfinden wir das Licht als weiß. Fehlt ein Farbanteil, so wird das Licht als Mischfarbe der beiden anderen Farben empfunden. Bei dieser „additiven“ Farbmischung sind die Grundfarben also Rot, Grün und Blau. Eine Mischung von Rot und Grün ergibt Gelb, eine Mischung von Rot und Blau ergibt Magenta, eine Mischung von Grün und Blau ergibt die Farbe Cyan.

Photometrie

Additive und subtraktive Farbmischung



Farbkombinationen bei einer additiven Farbmischung.

Photometrie

Additive und subtraktive Farbmischung

Additive Farbmischung tritt beispielsweise bei mehrfarbigen Leuchtdioden (LEDs) auf. Lässt man eine Duo-LED gleichzeitig Rot und Grün leuchten, so ergibt sich ein gelblicher Farbton. Dieser Effekt wird nicht nur bei Computer-Displays verwendet, sondern tritt allgemein immer dann auf, wenn ein Material in einer Lichtquelle zum Leuchten angeregt wird. Beobachtet man ein so genanntes Emissions-Spektrum beispielsweise einer Leuchtstoffröhre, so erkennt man einzelne Farbanteile, die sich in der Summe zu einem weißlichen Licht addieren.

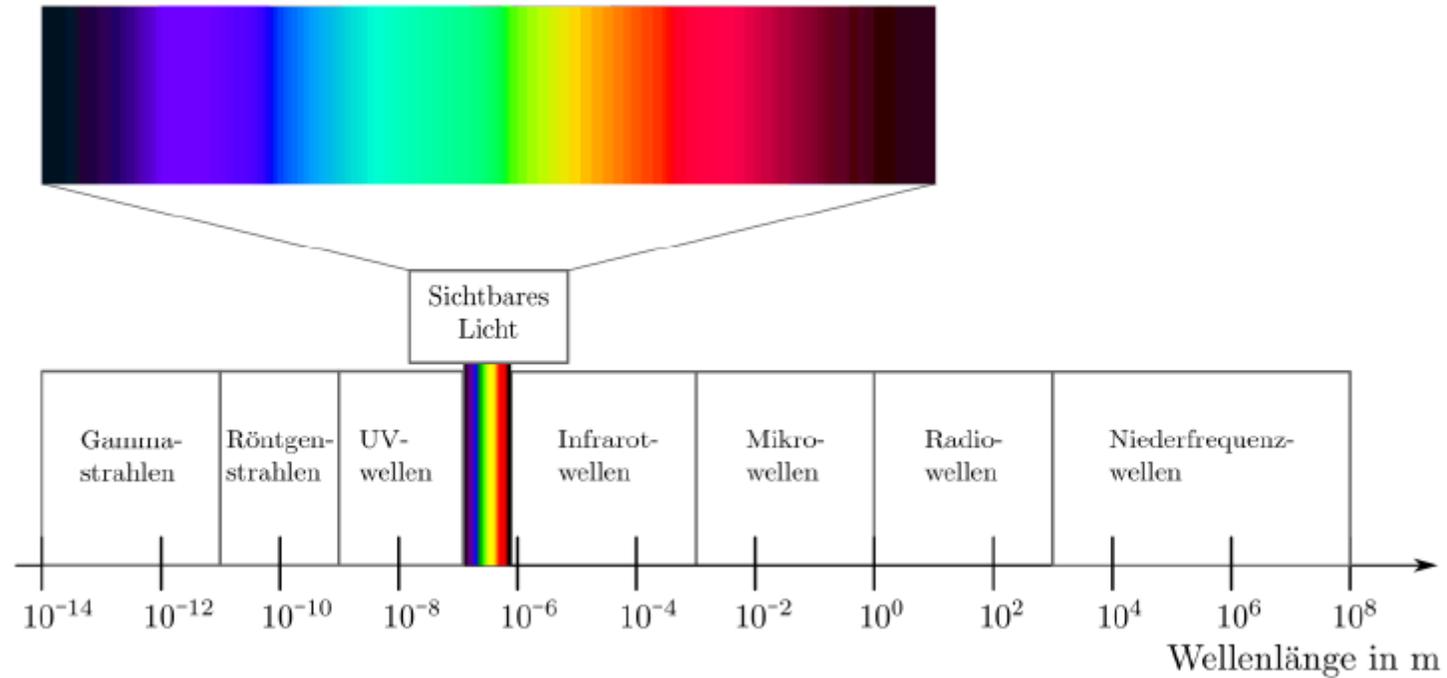
Photometrie

Funktionsprinzip von Spektrometern

Das, was man üblicherweise als (farbiges) „Licht“ bezeichnet, ist nur ein kleiner Teil des Spektrums elektromagnetischer Strahlung. In der folgenden Abbildung ist dies schematisch dargestellt.

Photometrie

Funktionsprinzip von Spektrometern



Spektrum des Lichts und der elektromagnetischen Wellen.

Photometrie

Funktionsprinzip von Spektrometern

Sonnenlicht enthält Licht aus dem gesamten sichtbaren Farbspektrum, es erscheint uns daher, wie bereits oben beschrieben, als weiß. Trifft ein dünner Lichtstrahl weißen Lichts auf ein *Prisma* oder ein *optisches Gitter*, so wird er in seine Spektralfarben aufgefächert; das Licht erscheint als Regenbogen.

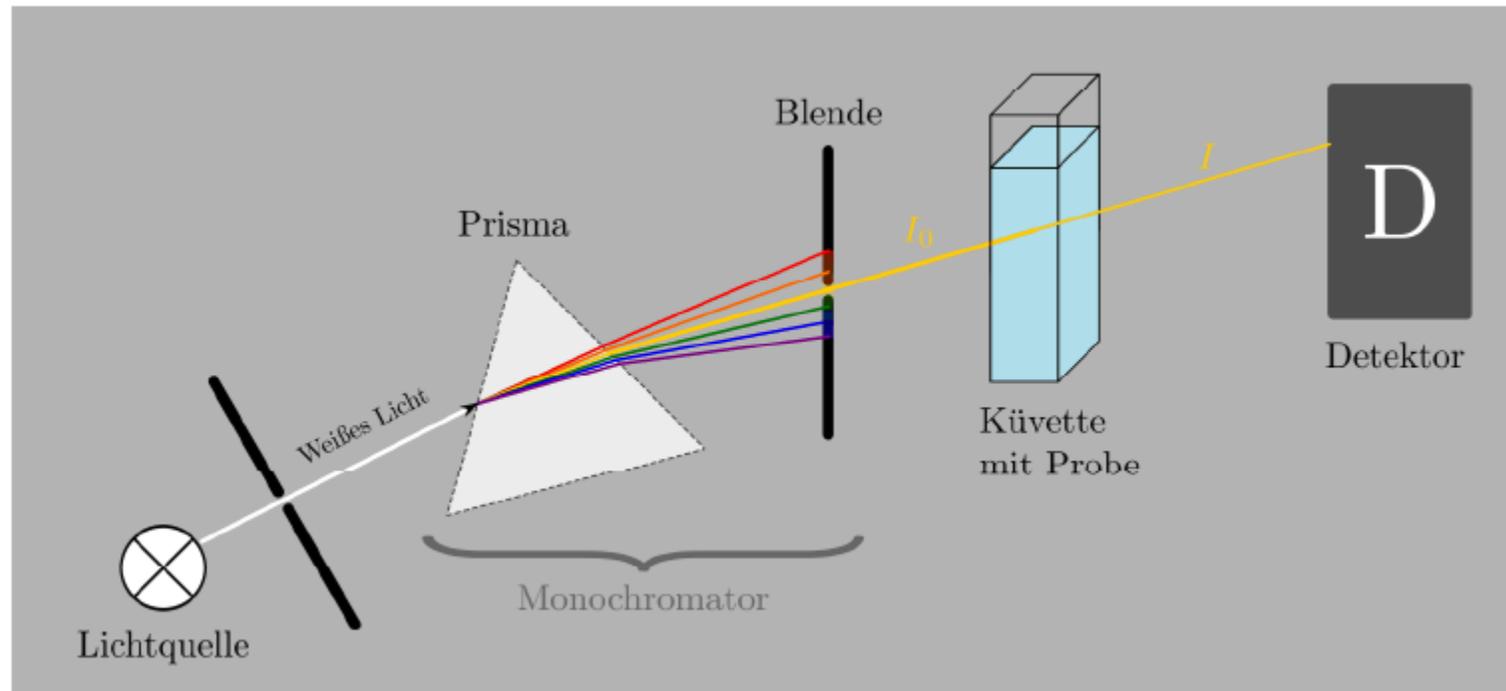
Photometrie

Funktionsprinzip von Spektrometern

Mittels einer fein eingestellten Blende kann man damit gezielt Licht mit einer bestimmten Wellenlänge aus dem Spektrum auswählen. Man erhält somit eine einfarbige („monochromatische“) Lichtquelle, allerdings mit einstellbarer Wellenlänge. Strahlt man nun mit einer derartigen Lichtquelle auf eine Material-Probe (welche oftmals in gelöster Form vorliegt und daher in eine Glas-Küvette gegeben wird), so wird das Licht von dieser je nach Substanz der Probe unterschiedlich stark absorbiert. Misst man die Absorption der Probe bei verschiedenen Wellenlängen, so erhält man ein für die jeweilige Substanz charakteristisches Bild, also quasi einen „Fingerabdruck“ der Probe.

Photometrie

Funktionsprinzip von Spektrometern



Schematischer Aufbau eines Spektrometers

Photometrie

Funktionsprinzip von Spektrometern

Ein Spektrometer, wie es heute zur Materialanalyse genutzt wird, besteht also im Wesentlichen aus vier Teilen:

Einer Lichtquelle, Monochromator, Probe und Detektor.

Photometrie

Funktionsprinzip von Spektrometern

- Eine **Lichtquelle**, in der Regel eine Halogenlampe, sendet weißes („polychromatisches“) Licht aus.
- Ein **Monochromator** „zerlegt“ dieses Licht in monochromatisches Licht, also Strahlung einer bestimmten, einstellbaren Wellenlänge. Die Zerlegung kann entweder mittels eines Prismas oder mittels eines optischen Gitters erfolgen.

Ein Prisma erzeugt nur *ein* Spektrum und ermöglicht daher eine höhere Leuchtkraft, ist aber nur schwer kalibrierbar. Ein optisches Gitter fächert das Licht in eine Vielzahl von Einzel-Spektren auf, ist dafür jedoch aufgrund des bereits im Abschnitt *Wellenoptik* beschriebenen Zusammenhangs wesentlich einfacher kalibrierbar.

Mittels einer schmalen, verschiebbaren Blende kann gezielt eine Lichtfarbe beziehungsweise ein nur sehr schmaler Bereich von Wellenlängen selektiert werden.

Photometrie

Funktionsprinzip von Spektrometern

- Die **Probe**, häufig in einer Flüssigkeit gelöst, absorbiert einen Teil des Lichts. Während die die Lichtstärke des vom Monochromator ausgehenden Strahls noch I_0 beträgt, verlässt der Strahl die Probe mit einer verringerten Intensität I .
- Ein **Detektor** misst die durch die Probe gehende Intensität der Lichtstrahlung und leitet die gemessenen Daten zur Auswertung an einen Computer weiter.

Photometrie

Das Lambert-Beersche Gesetz

Mit einem Spektrometer wird gemessen, wie stark Licht bei einer genau festgelegten Wellenlänge beim Durchgang durch eine mit einer flüssigen Probe gefüllten Küvette geschwächt wird. Beim Durchgang durch die Lösung wird das Licht exponentiell geschwächt, denn die in einer bestimmten „Schichttiefe“ absorbierte Lichtmenge ist proportional zur dort vorhandenen Lichtmenge. Immer, wenn die Änderung einer Größe proportional zum jeweiligen Wert der Größe ist, lässt sich die Zu- beziehungsweise Abnahme der Größe mittels einer Exponentialfunktion beschreiben.

Photometrie

Das Lambert-Beersche Gesetz

Der Zusammenhang zwischen der ursprünglichen Intensität I_0 des Lichts vor der Probe und der Intensität I , die durch die Probe hindurchgeht beziehungsweise den Schirm erreicht, kann also folgendermaßen beschrieben werden:

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot d}$$

Photometrie

Das Lambert-Beersche Gesetz

Hierbei bezeichnet d die Schichtdicke der Probe, also die (innere) Breite der Küvette. Der Proportionalitätsfaktor k heißt „Extinktionskoeffizient“ und hängt von der Art und Konzentration der flüssigen Probe sowie von der Wellenlänge des Lichts ab.

Die Schwächung („Extinktion“) des Lichts ergibt sich aus dem Quotienten von I und I_0 :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-k \cdot d}$$

Photometrie

Das Lambert-Beersche Gesetz

Um diese Gleichung nach dem Extinktionskoeffizienten k auflösen zu können, müssen beide Seiten der Gleichung **logarithmiert** werden. Man erhält:

$$\ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = k \cdot d$$

Üblicherweise wird in der Photometrie nicht mit dem natürlichen Logarithmus, sondern mit dem dekadischen gerechnet; für die Umrechnung gilt:

$$\begin{aligned} \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) &= \frac{\ln \left(\frac{I_0}{I} \right)}{\log_{10}(e)} \approx 0,43 \cdot \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \\ &= 0,43 \cdot k \cdot d = \varepsilon \cdot c \cdot d \end{aligned}$$

Photometrie

Das Lambert-Beersche Gesetz

Hierbei bezeichnet man den Faktor ε als molaren dekadischen Extinktionskoeffizient der betreffenden gelösten Substanz für die verwendete Wellenlänge; mit c wird die molare Konzentration der gelösten Substanz angegeben. Dieser Zusammenhang, dass die Konzentration des gelösten Stoffes proportional zum Logarithmus der Extinktion $\frac{I_0}{I}$ ist, wird nach ihren Entdeckern **Lambert-Beer'sches-Gesetz** genannt.

Photometrie

Das Lambert-Beersche Gesetz

Hierbei bezeichnet man den Faktor ε als molaren dekadischen Extinktionskoeffizient der betreffenden gelösten Substanz für die verwendete Wellenlänge; mit c wird die molare Konzentration der gelösten Substanz angegeben. Dieser Zusammenhang, dass die Konzentration des gelösten Stoffes proportional zum Logarithmus der Extinktion $\frac{I_0}{I}$ ist, wird nach ihren Entdeckern **Lambert-Beer'sches-Gesetz** genannt.