

# Geometrische Optik

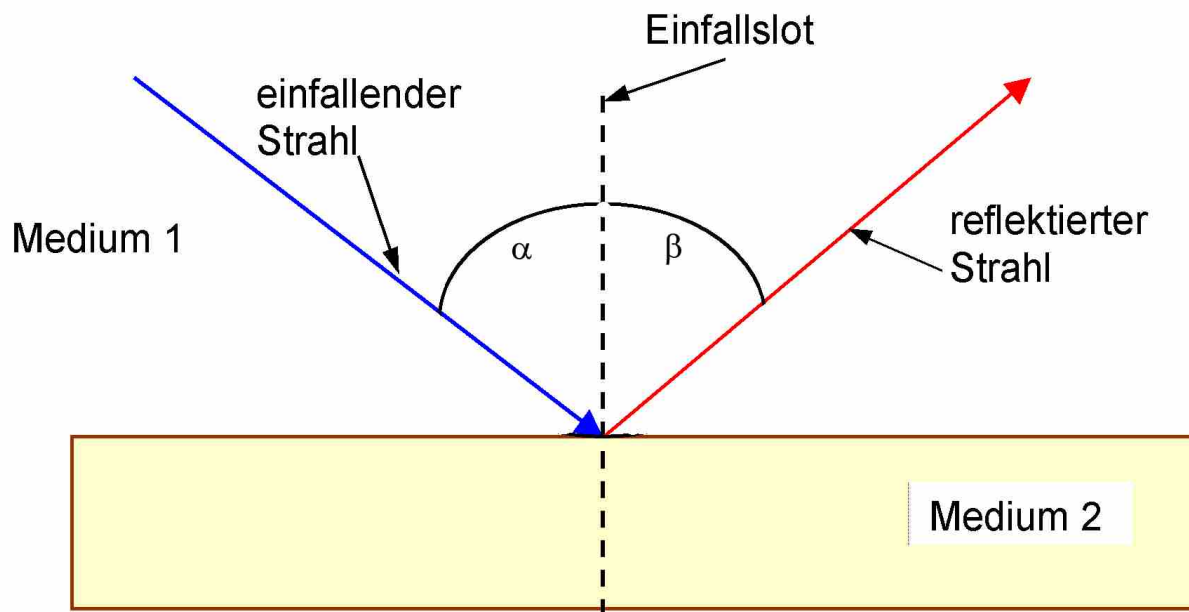
Um das Verhalten von Licht in der makroskopischen Welt zu beschreiben, insbesondere um die Funktionsweise von **optischen Instrumenten** zu verstehen, reicht ein *idealisiertes Bild* der Lichtausbreitung aus: wir vergessen die Wellennatur des Lichtes und betrachten die Ausbreitung von (gedachten) **Strahlen** oder **Strahlenbündel**. Diese sind (beliebig dünne) Linien, die senkrecht zu den Wellenfronten stehen und sich geradlinig ausbreiten, außer bei Wechselwirkung mit *optischen Elementen*.

---

## Optische Elemente; Reflexion und Brechung

Optische Elemente fallen (grob gesagt) in drei Gruppen: **Spiegel**, **Prismen**, und **Linsen**. Sie wechselwirken mit den Lichtstrahlen durch zwei Phänomene: die **Reflexion** und die **Brechung**. Beide finden im Prinzip bei jedem *Übergang* eines Lichtstrahls *von einem Medium zum anderen* statt.

Die **Reflexion** eines Lichtstrahls ähnelt den *voll-elastischen Stoß* eines Teilchens mit einer *flachen Wand*: die Impuls-komponente senkrecht zur Wand wird umgekehrt, die Komponenten parallel zur Wand bleiben unverändert. Das Ergebnis ist ein **reflektierter Strahl**, der in **einer Ebene** mit dem einfallenden Strahl sowie der Flächennormale ('Einfallslot') liegt, und den **gleichen Winkel** mit dem Lot bildet ('Ausfallswinkel  $\gamma'$ '), wie der einfallende Strahl ('Einfallswinkel  $\alpha'$ ):



Die **Brechung** findet statt, wenn der einfallende Strahl (teilweise) in das zweite Medium *eindringt* (transparentes Medium!), dort aber eine *andere Ausbreitungsgeschwindigkeit* hat, als im ersten Medium.

Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit**  $c_0$  (im Vakuum) wird von den *elektromagnetischen Eigenschaften des Vakuums* ( $\epsilon_0$  = 'elektrische Elastizität' des Vakuums;  $\mu_0$  = 'elektrische Trägheit' des Vakuums) bestimmt.

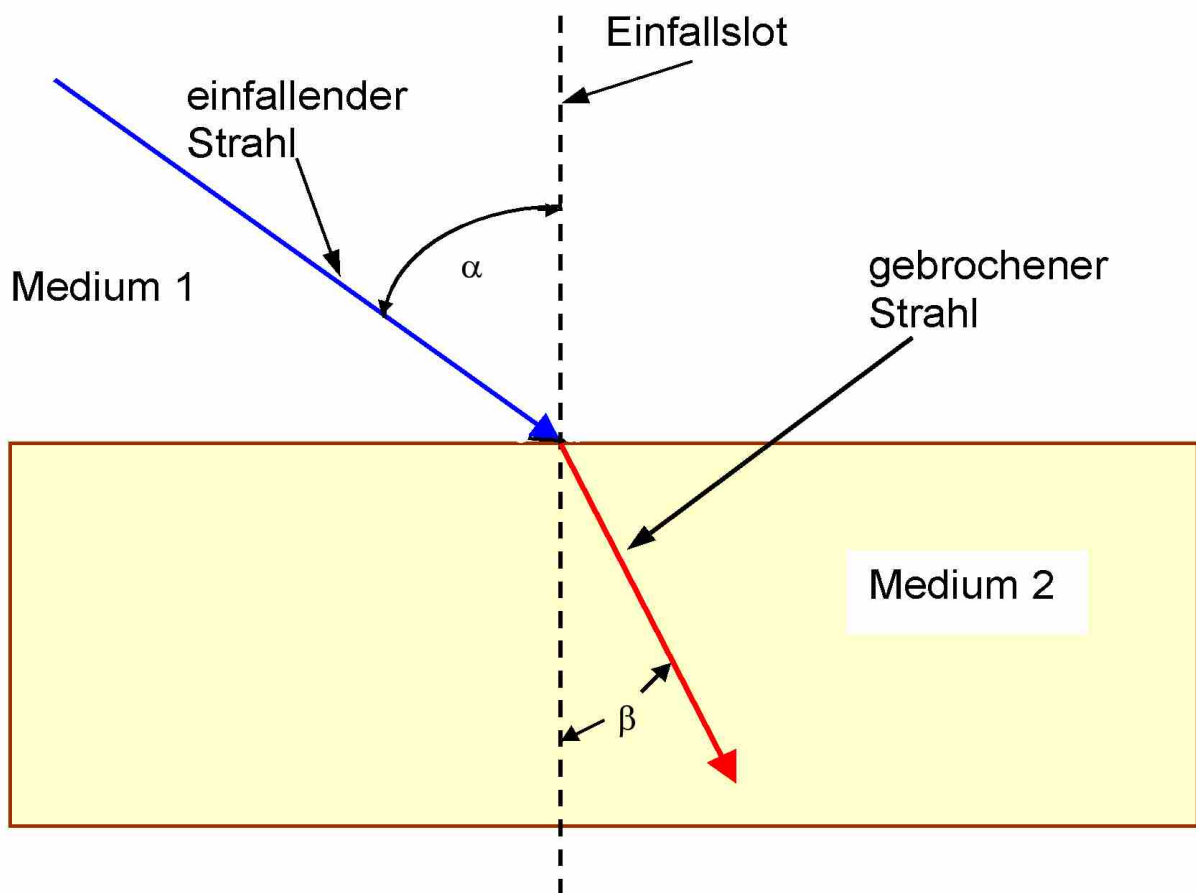
Ein *materielles Medium* hat **veränderte Eigenschaften** als Träger von elektromagnetischen Wellen (relative Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$ , relative Permeabilitätszahl  $\mu_r$ ). Diese multiplizieren die Konstanten  $\epsilon_0$  und  $\mu_0$  und ergeben somit die **Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium**,  $c_M$ :

$$c_M = 1/\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0} = c_0/\sqrt{\epsilon_r \mu_r}.$$

Eine *Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit* hat auch eine **Änderung der Wellenlänge**  $\lambda$  zur Folge (aufgrund von  $c = \lambda v$ ; die Frequenz  $v$  bleibt konstant!). Außerdem ändert sich die **Ausbreitungsrichtung**, wenn der einfallende Strahl nicht

senkrecht auf die Grenzfläche trifft.

Dies kann man mit geometrischen Modellen verstehen (Auf-treffen der Wellenfronten, marschierende Soldaten, Prinzip der kürzesten Durchlaufzeit). Da die Konstanten  $\epsilon_r$  und  $\mu_r$  des Materials von der Lichtfrequenz abhängen, ist die Brechung auch **frequenzabhängig (Dispersion)**: Licht höherer Frequenz (bzw. kürzerer Wellenlänge) wird *stärker* gebrochen!



Den **Brechungswinkel** kann man mit Hilfe der **Snellius-Formel** berechnen:

$$\sin \alpha / \sin \beta = c_{M1} / c_{M2} = N_2 / N_1$$

wobei  $\alpha$  der Einfallswinkel und  $\beta$  der Winkel des gebrochenen Strahls zum Einfallslot sind, und  $M_1$  bzw.  $M_2$  bezeichnen die beiden **Medien**.

Die dimensionslosen Zahlen  $N_1$  und  $N_2$  werden '**Brechzahlen**' oder '**Brechungsindizes**' genannt; sie sind definiert als das Verhältnis der **Lichtgeschwindigkeit**  $c_0$  im Vakuum zur **Lichtgeschwindigkeit**  $c_M$  im Medium:

$$N_1 = c_0/c_{M1} .$$

Mit der obigen Formel für die **Lichtgeschwindigkeit** sieht man, daß

$$N = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

gilt. Da die Permeabilität  $\mu_r$  für alle transparenten Medien etwa gleich 1 ist, wird oft als gute Näherung  $N = \sqrt{\epsilon_r}$  gesetzt.

Beide Phänomene -- **Reflexion** und **Brechung** -- können mithilfe eines **Dipol-Modells** mit der Wellentheorie des Lichtes in Einklang gebracht werden.

Dabei wird in der Materie die *Anwesenheit von elementaren elektrischen Dipolen* (in Wahrheit die Atome und Moleküle) vorausgesetzt. Der einfallende Strahl (**Primärstrahl**) regt sie zu **erzwungenen Schwingungen** an, die schwingenden Dipole *strahlen* wieder **Sekundärstrahlen** ab. Der reflektierte Strahl besteht aus solchen Sekundärstrahlen, der gebrochene Strahl aus der **Überlagerung** des Primärstrahls mit vorwärts gerichteten Sekundärstrahlen. Mit diesem Modell kann man auch die **Polarisation** der reflektierten Strahlen erklären.

---

<https://www.leifiphysik.de/optik/lichtbrechung/versuche/reflexion-und-brechung-von-licht-simulation>

## Die Wirkung von *gekrümmten Flächen*: **Hohlspiegel, Linsen**, ..

Die obigen Betrachtungen der Reflexion und Brechung gelten zunächst für *ebene Grenzflächen*. Wenn wir optische Elemente mit **gekrümmten Grenzflächen** (**Hohlspiegel, Linsen**) verwenden, können einfallende Lichtstrahlen in *einen Brennpunkt gesammelt* bzw. *zerstreut* werden. Dies bildet die Basis aller **bildgebenden optischen Instrumenten**, angefangen mit dem menschlichen Auge.

Gekrümmte Flächen heißen **konvex**, wenn sie *nach außen* gewölbt sind; sie heißen **konkav**, wenn sie *nach innen* gewölbt sind.

Ein **konkaver** Spiegel (**Hohlspiegel**) bündelt einfallende Lichtstrahlen in einen Brennpunkt, er *sammelt* sie durch **Reflexion**.

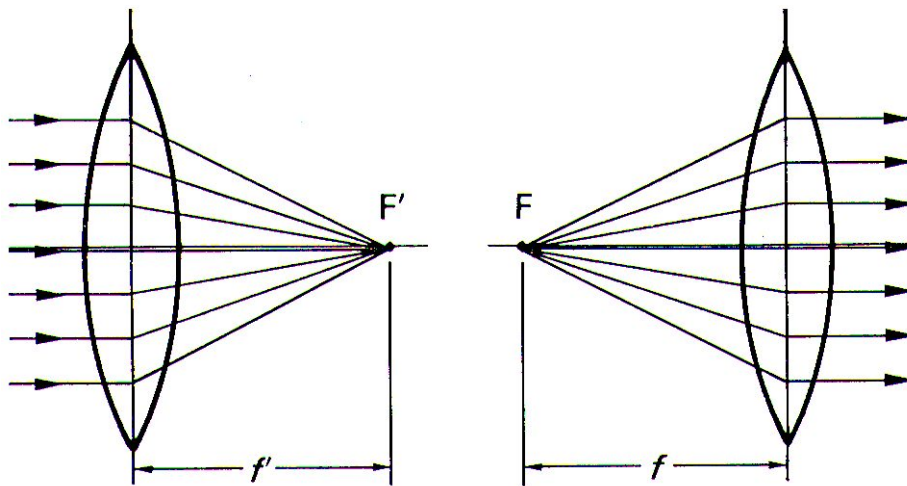
**Linsen** sind symmetrisch gekrümmte Körper aus transparentem Material --Glas oder Kunststoff-- welche Lichtstrahlen durch **Brechung** sammeln oder zerstreuen. Ihre Brechungsindizes  $N$  sind höher, als der des umgebenden Mediums.

**Bikonvexe** Linsen (*in der Mitte dicker*) wirken immer als Sammellinsen;

**bikonkave** Linsen (*in der Mitte dünner*) wirken immer als Zerstreuungslinsen;

**konkavo-konvexe** Linsen (z.B. Brillengläser) können Sammellinsen oder Zerstreuungslinsen sein, je nach dem, *ob sie in der Mitte dicker oder dünner sind, als am Rande*.

Als Beispiel betrachten wir den Fall einer **Sammellinse**. Zur Vereinfachung nimmt man üblicherweise an, daß die Brechung der Lichtstrahlen, die in Wirklichkeit an *zwei* Grenzflächen geschieht (hintere und vordere Fläche der Linse) nur *einmal* --in der sog. **Hauptebene** der Linse-- stattfindet. (Diese Näherung gilt für dünne Linsen, deren Dicke am Mittelpunkt viel kleiner als der Durchmesser ist.) Die Symmetrieachse durch den Linsenmittelpunkt und senkrecht zur Hauptebene heißt '*optische Achse*' der Linse.



**Zwei Sammellinsen:** *links* kommen parallele Strahlen von der Vorderseite der Linse, sie werden im hinteren Brennpunkt  $F'$  gesammelt; *rechts* kommen Strahlen von einer Punktquelle am vorderen Brennpunkt  $F$ , sie werden zu Parallelstrahlen hinter der Linse gemacht (Linse als Kondensier).

Eine **dünne Sammellinse** bricht von vorne einfallende *achsenparallele Strahlen* so, dass sie durch den **hinteren Brennpunkt**  $F'$  gehen.

Die Entfernung des Brennpunktes vom Linsenmittelpunkt nennt man die **Brennweite**  $f$ . Der *Kehrwert* der Brennweite ist ein Maß für die Stärke der Linse, er heißt **Brechkraft**  $D$ :

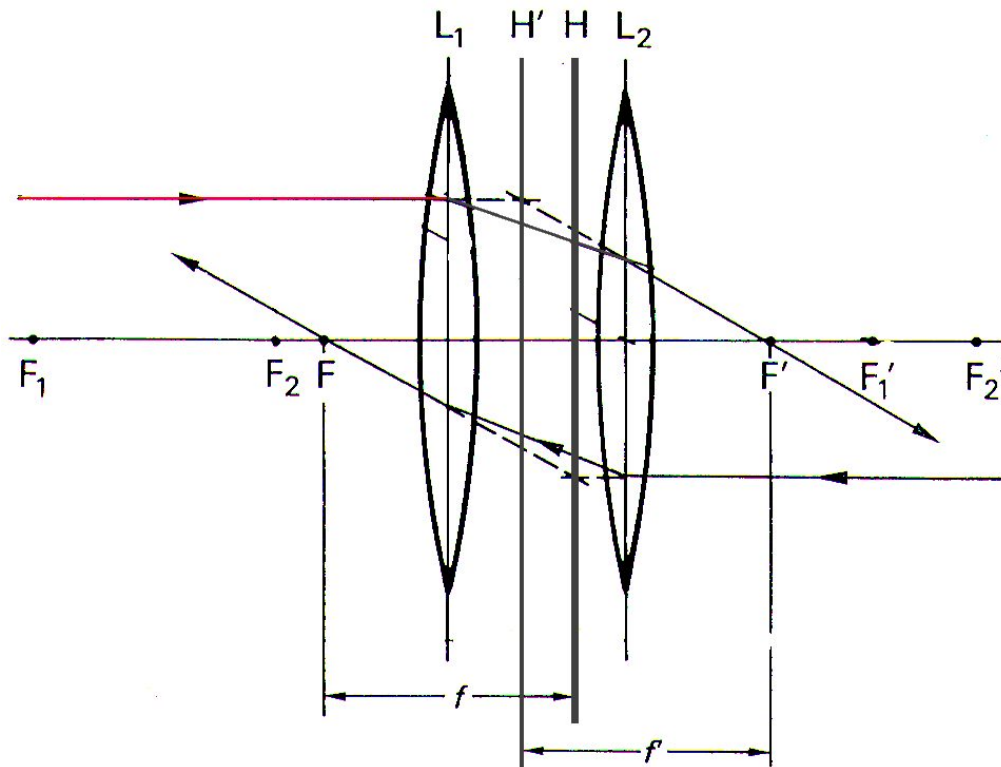
$$D = 1/f \quad (\text{Einheit: } \text{Dioptrie} = 1/\text{m}, 1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}).$$

Die Brechkräfte dünner Linsen, die hintereinander aufgestellt

sind, **addieren** sich einfach, solange sie nicht zu weit auseinander stehen (Brechung an *einer einzigen Hauptebene*):

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

Bei größeren Entfernungen der Linsen muß ein *Korrekturterm* eingefügt werden.



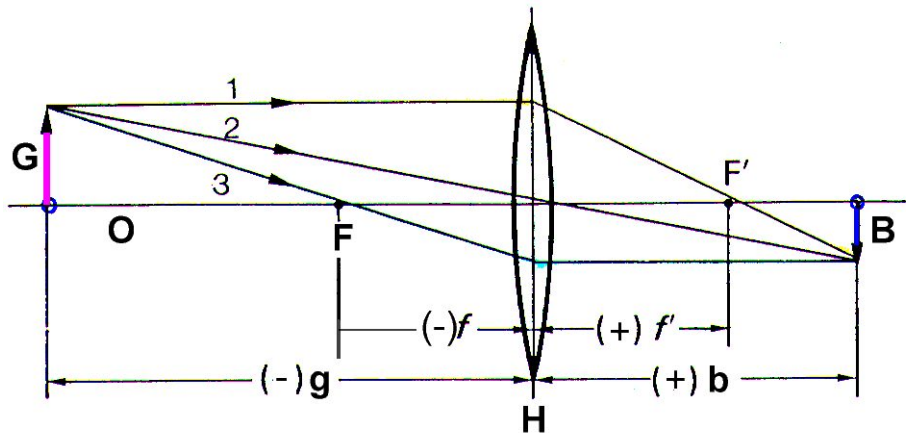
**Zwei Linsen hintereinander auf der gleichen optischen Achse.** Von links kommenden Strahlen (rot) brechen an den beiden Hauptebenen  $L_1$  und  $L_2$ ; dies kann als Brechung durch eine einzige, stärkere Linse mit der Hauptebene  $H'$  und Brennweite  $f'$  aufgefaßt werden. Strahlen von rechts werden scheinbar an der Hauptebene  $H$  gebrochen.

**Zerstreuungslinsen** brechen einfallende Parallelstrahlen so, daß sie auf der Hinterseite der Linse auseinandergehen (*divergente* Strahlen); ihre rückwärtigen Verlängerungen treffen sich jedoch vor der Linse am **vorderen Brennpunkt  $F$** . Die **Brennweite  $f$**  ist daher **negativ**, ebenfalls die **Brechkraft  $D$** . Die Kombination einer Sammellinse und einer Zerstreuungslinse gibt eine Linse mit *kleinerer Brechkraft*.

Die **Bildentstehung** bei einer Sammellinse zeigt die Skizze.



Man benutzt dazu zweckmäßigerweise **drei Strahlen**, die von **einem** Punkt des abzubildenen Gegenstandes ausgehen:



**Abbildung durch eine Sammellinse** der Brennweite  $f$  und Brechkraft  $D = 1/f$ , mit optischer Achse **O** und Hauptebene **H**. Im Abstand  $(-)g$  vor der Hauptebene steht ein Gegenstand der Größe  $G$ ; er wird hinter der Linse als reelles Bild der Größe  $B$  im Abstand  $b$  abgebildet.

- (1) einen **achsenparallelen Strahl**, der von der Linse zum **Brennpunktstrahl** gemacht wird;
- (2) einen **Mittelpunktstrahl**, der *ungebrochen* weitergeht; sowie
- (3) einen **Brennpunktstrahl** (durch den *vorderen Brennpunkt*  $F$ ), der zum **Parallelstrahl** auf der hinteren Seite der Linse wird.