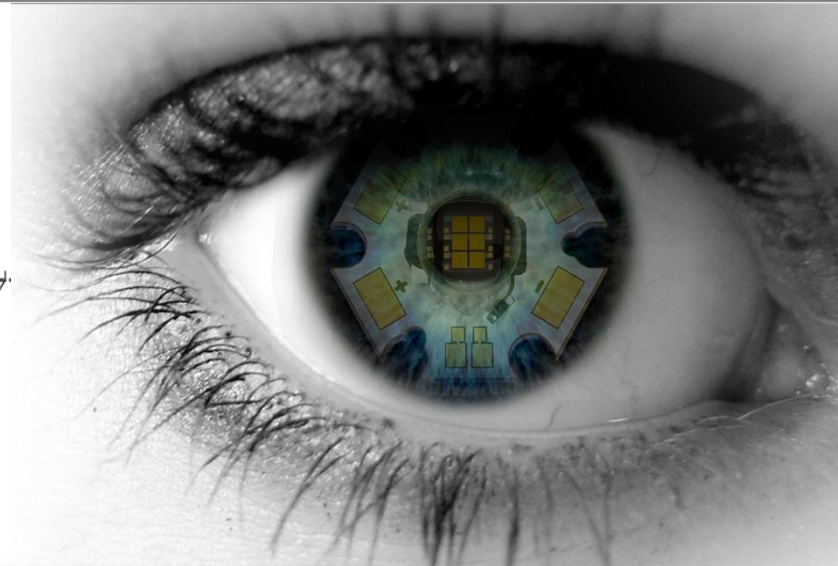
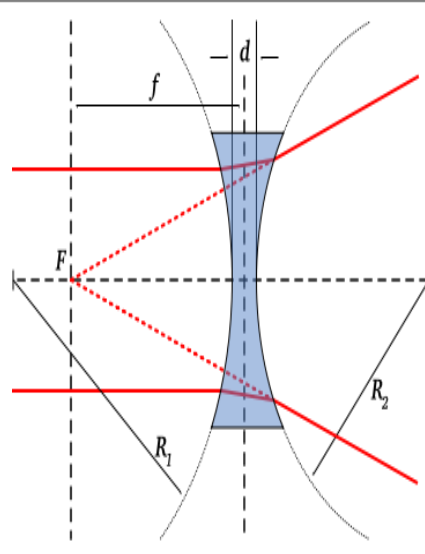


Optik

Cornelius Neumann LTI

Lichttechnisches Institut (LTI)



Ansprechpartner

- Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
e-mail: cornelius.neumann@kit.edu
Tel.: 608 460 52 (608 425 29 Sekretariat Frau Holeisen)
- M.-Sc. Markus Katona
markus.katona@kit.edu
Tel.: +49 721 608 42543

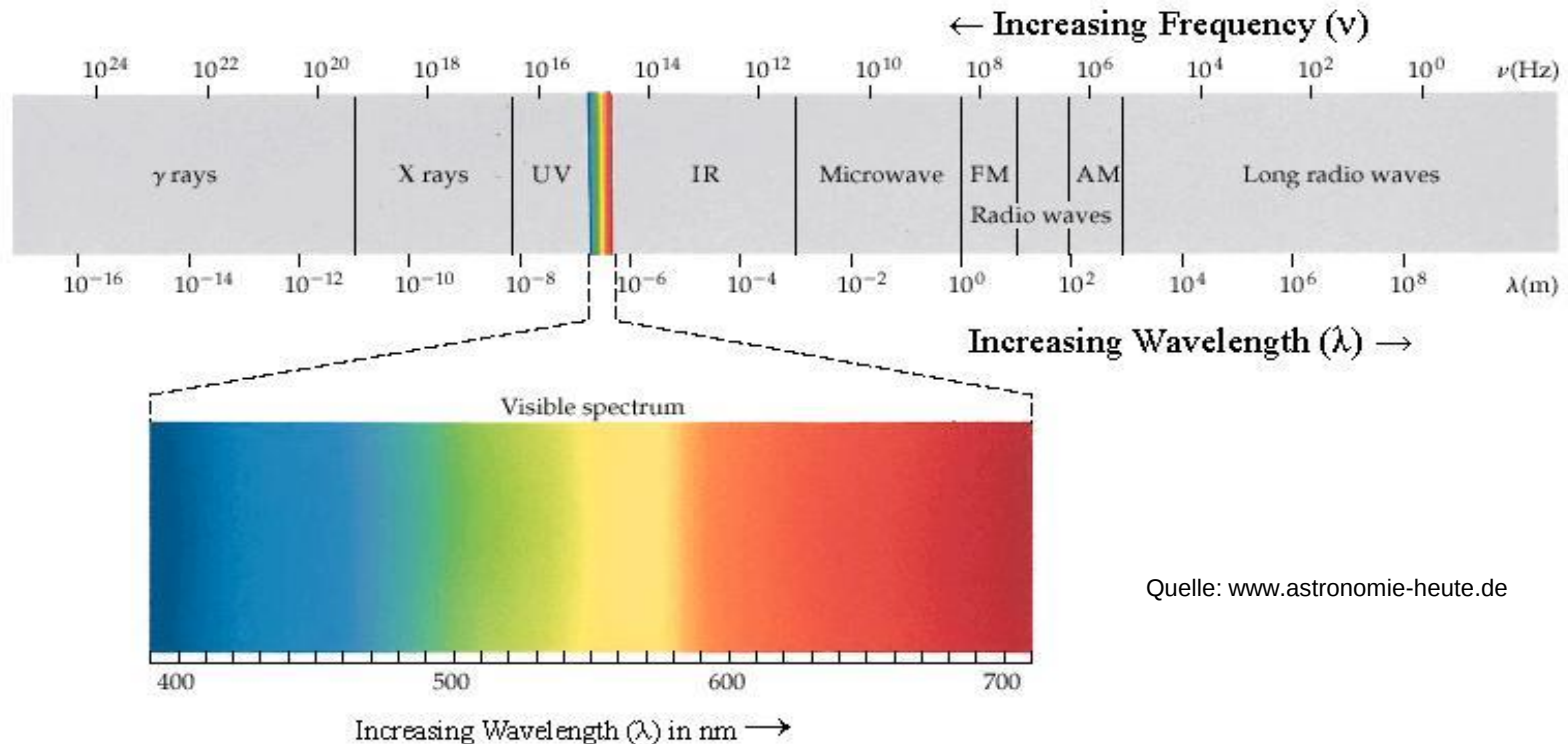
Literaturempfehlungen

- „Optik“ von E. Hecht, Oldenburg (2005)
- „Optik für Ingenieure“ von F. Pedrotti, Springer (2005)
- „Lehrbuch der Experimentalphysik: Band 3 Optik“, L. Bergmann, C. Schaefer, H. Niedrig, Gruyter (2004)

Inhalt

- Grundlagen
- Reflexion & Brechung
- Absorption
- Spiegel
- Prismen & Linsen
- Polarisation
- Beugung & Interferenz

Grundlagen: Was ist Licht?



Quelle: www.astronomie-heute.de

Definition: Licht ist die für das menschliche Auge sichtbare elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von ca. 380 nm bis 780 nm (Frequenzbereich 790 THz bis 380 THz).

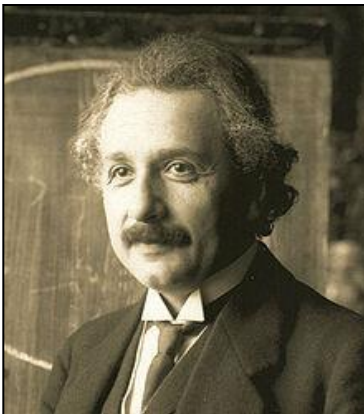
Licht hat sowohl einen **Wellen-** als auch einen **Teilchencharakter**.

Grundlagen: Was ist Licht?



J. C. Maxwell (1831-1879)

„This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reason to conclude that light itself (including radiant heat, and other radiations if any) is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws.“



A. Einstein (1879-1955)

Quellen: www.wikipedia.de,

Annalen der Physik 17/1905

Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen über die „schwarze Strahlung“, Photolumineszenz, die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht und andere die Erzeugung bez. Verwandlung des Lichtes betreffende Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.

Grundlagen: Was ist Licht?

Der Dualismus von Welle und Teilchen ist ein typisches Phänomen der **Quantenmechanik**.

Welle: Licht ist eine (elektromagnetische) Welle, welche sich kontinuierlich ausbreitet (und deren Eigenschaften aus den Maxwell Gleichungen ableitbar sind)

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Teilchen: Licht setzt sich aus Teilchen zusammen, deren Energie sich aus der jeweiligen Lichtfrequenz ergibt

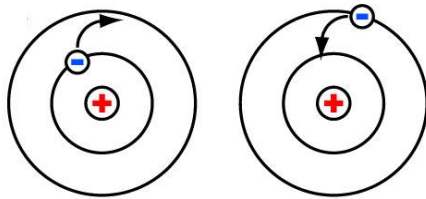
$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \qquad h = 6,626 \cdot 10^{-23} \text{ Js}$$

Grundlagen: Woher stammt Licht?

Sender und Empfänger sind größenordnungsmäßig im Nanometer (10^{-9} m) und Angströmbereich (10^{-10} m) einzuordnen.

⇒ **Licht ist eine Nachricht aus der Welt der Atome!**

Teilchenbild: Beim Übergang von einem atomaren/molekularen Energieniveau wird ein Photon der entsprechenden Übergangsenergie emittiert oder absorbiert.

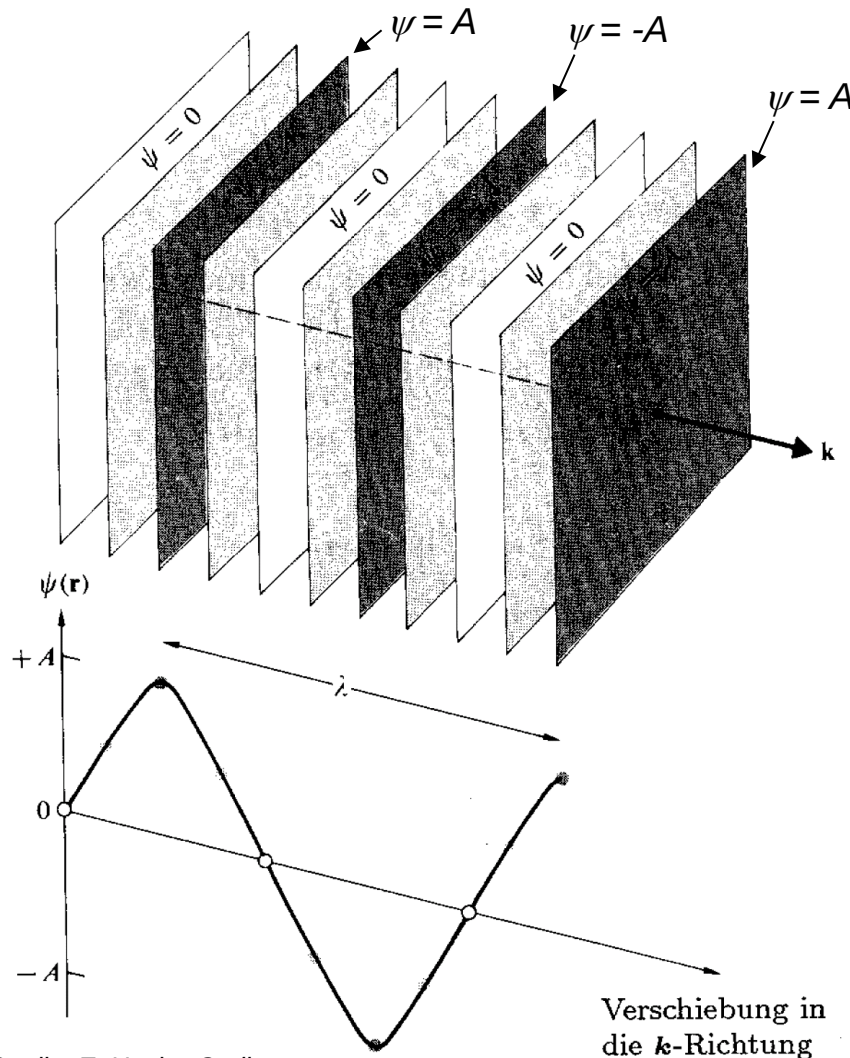


Anregung

Rekombination

Im Rahmen der Optik reicht es zumeist aus, Licht im Wellenbild oder noch vereinfachend im Strahlenbild zu betrachten.

Grundlagen: Ebene Wellen

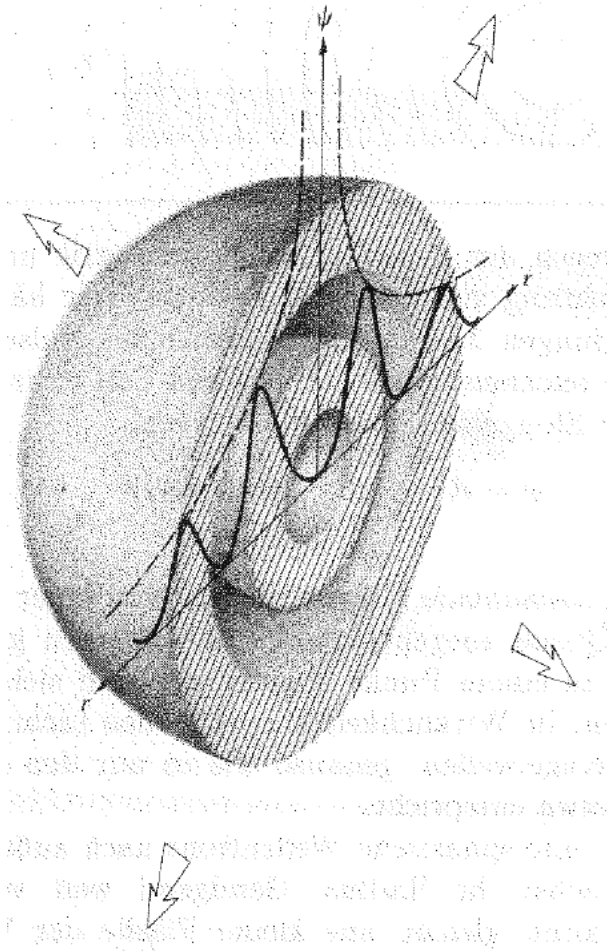


Quelle: E. Hecht, *Optik*

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot e^{-i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

- Ebenen konstanter Feldamplitude:
 - Konstante Feldamplitude entspricht konstanter Phase der Welle
- Fläche konstanter Phase bzw. Feldamplitude heißt Wellenfront.

Grundlagen: Kugelwellen



Quelle: E. Hecht, *Optik*

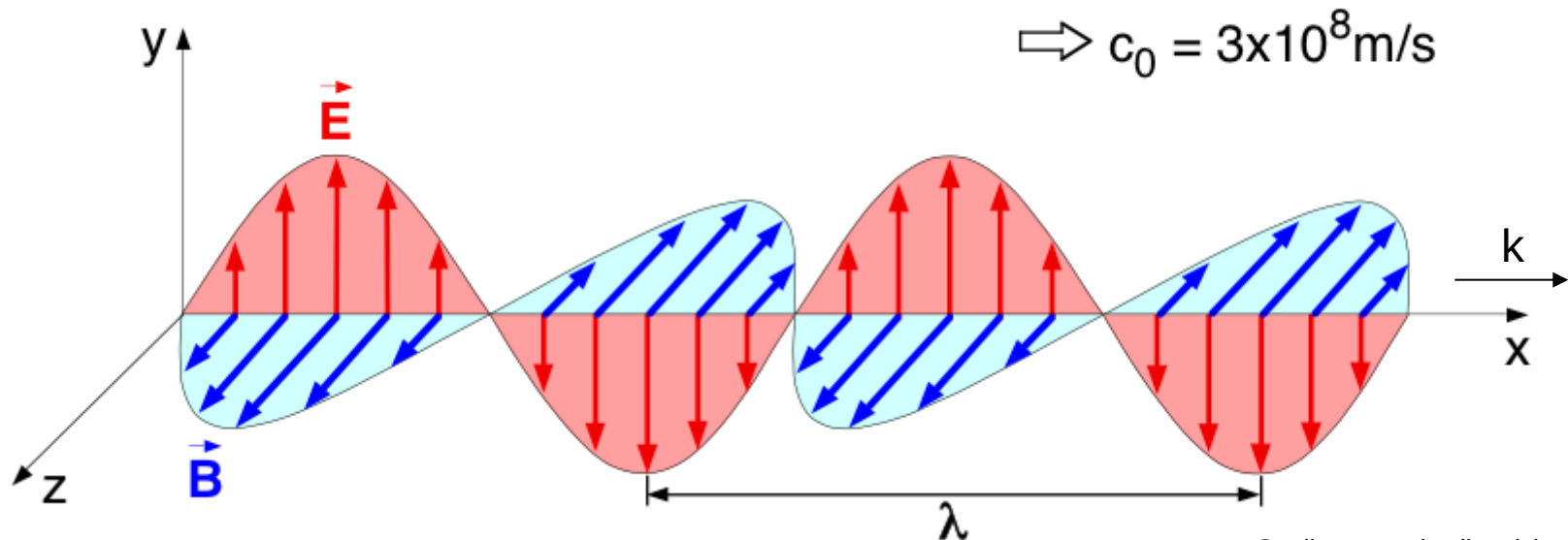
$$\vec{E}_{Kugel} = \frac{1}{r} \vec{E}_0 \cdot e^{-i(kr - \omega t)}$$

- Wellenfronten konstanter Phase sind Kugeloberflächen
- Ausbreitung von einem Punkt bei $\mathbf{r=0}$.
- Im Grenzfall großer r ergibt sich näherungsweise eine ebene Welle.

Grundlagen: Elektromagnetische Wellen

⇒ Werden Ladungen **beschleunigt** entstehen elektromagnetische Wellen. Welche sich mit Lichtgeschwindigkeit im jeweiligen Medium fortpflanzen. Sie benötigen **kein Medium** („Äther“), da sich el. und magn. Feld stets gegenseitig induzieren! Das el. Feld steht senkrecht auf dem magnetischen Feld. Beide Felder stehen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle ⇒ **transversale Welle**.

Ausrichtung des E-Feldes ⇒ **Polarisation**.



Quelle: www.physik.unizh.ch/

Grundlagen: Das Superpositionsprinzip

- Aus der mathematischen Beschreibung einer elektromagnetischen Welle (Helmholz Differentialgleichung) leitet man die folgende wichtige Eigenschaft ab.
- **Superpositionsprinzip:** Die Linearkombination von Lösungen (mit beliebigen Koeffizienten) einer homogenen linearen Differentialgleichung ist wieder eine Lösung dieser Gleichung.
- Physikalisch bedeutet dies, dass Wellen sich überlagern können, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.
- Weiterhin kann man eine beliebige Wellenform durch eine Kombination von „Elementarwellen“ ausdrücken $\Rightarrow$ Huygens Fresnel Prinzip.

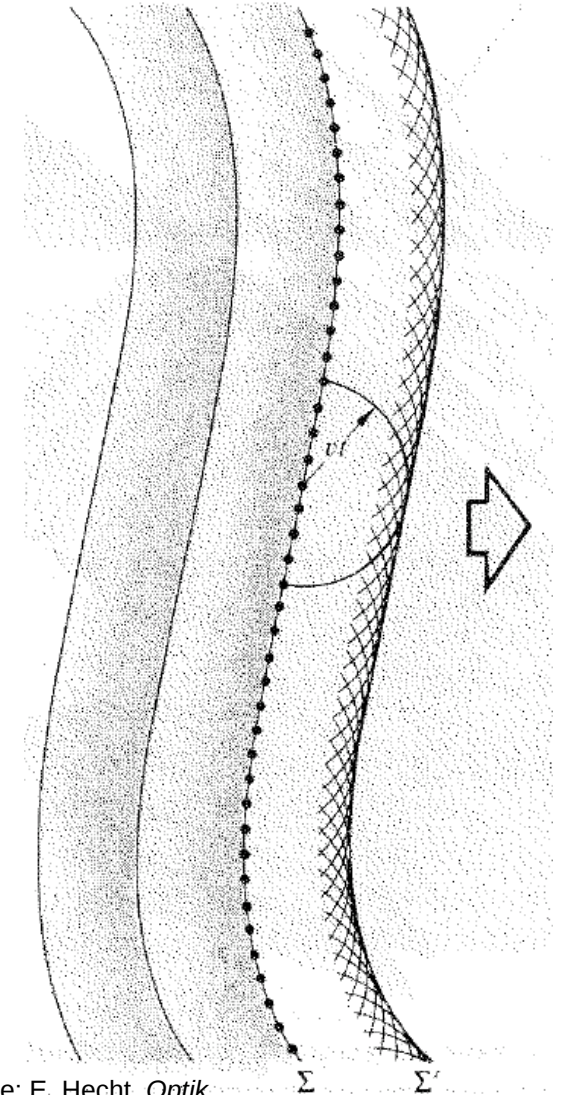
Grundlagen: Das Huygens Fresnel Prinzip

Hypothese von **Christian Huygens** (1690):

- Jeder Punkt auf primärer Wellenfront dient als Ursprung von **kugelförmigen sekundären Elementarwellen**.
- Primäre Wellenfront zu einer späteren Zeit ist Einhüllende dieser Elementarwellen.
- Wellen schreiten mit Geschwindigkeit und Frequenz entsprechend der Primärwelle im jeweiligen Raumpunkt fort.

Problem:

- Elementarwellen erzeugen rückwärts laufende Welle, die nicht existiert



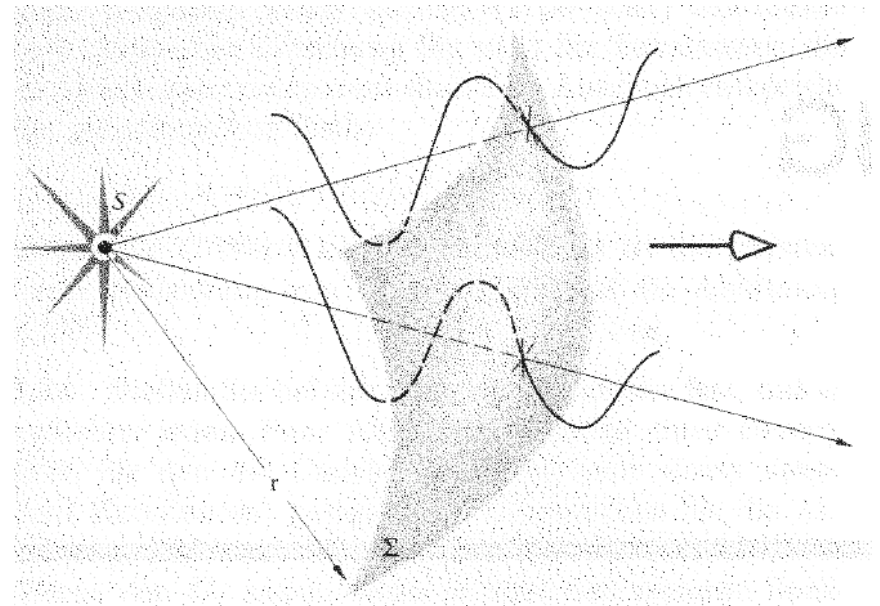
Quelle: E. Hecht, *Optik*

Grundlagen: Wellen und Strahlen

Statt Wellenfronten kann man zur Ausbreitung von Licht auch Strahlen betrachten, welche senkrecht auf der jeweiligen Wellenfront stehen.

Sobald sich die Ausbreitungsbedingungen einer Welle ändern verändert sich die Wellenfront und damit auch die Lichtstrahlen!

Strahlen können nicht als Darstellung verwendet werden um Interferenz- und Beugungsphänomene zu beschreiben.

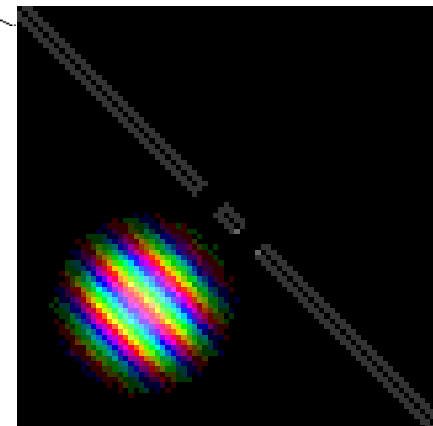
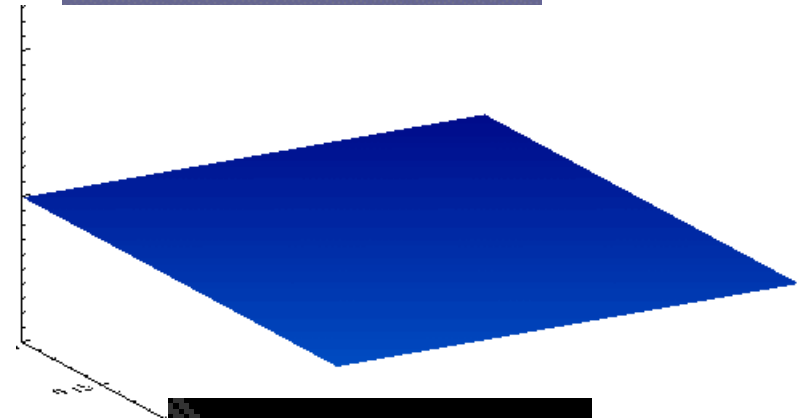
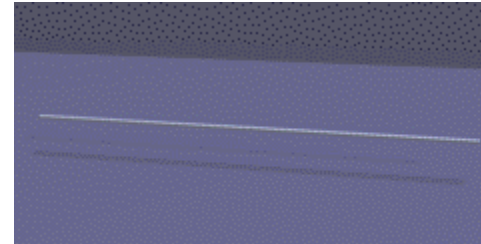


Quelle: E. Hecht, *Optik*

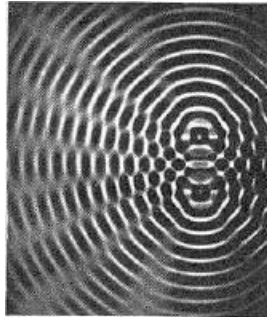
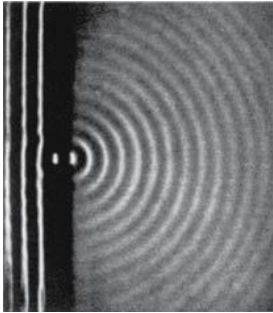
Eine typische Eigenschaft von Wellen ist die Fähigkeit zur Überlagerung oder **Interferenz**:

Eine Welle kann auch mit sich selbst interferieren:

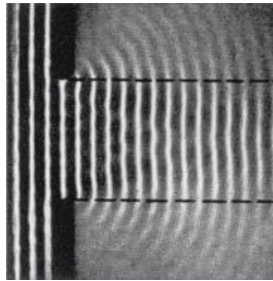
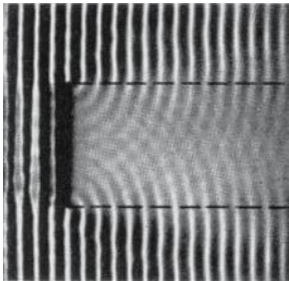
An kleinen Öffnungen ($d \leq \lambda$) wird eine Welle gebeugt, → Doppelspaltexperiment:



Quelle: www.wikipedia.de



Wellenoptik: Die betrachteten Elemente sind größenordnungsmäßig vergleichbar mit der Wellenlänge des Lichtes → Auflösung Mikroskop, Mikrooptik...



Strahlenoptik: Die betrachteten Elemente sind groß gegenüber der Lichtwellenlänge → Linsen, Spiegel...

Quelle: R. W. Pohl

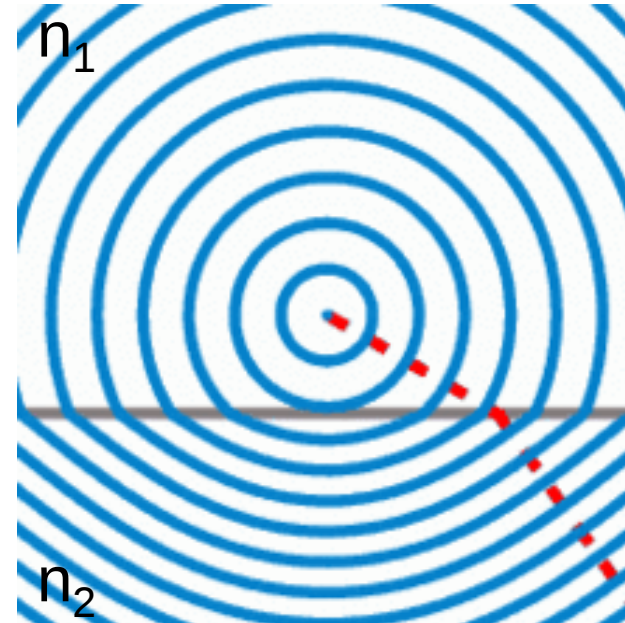
In der Strahlenoptik wird der Lichtweg nicht durch die Propagation von Wellenfronten, sondern vereinfacht durch **Lichtstrahlen** dargestellt. Sind die Lichtstrahlen ausreichend dicht gewählt (→ Ray Tracing) können daraus die Form der Wellenfronten rekonstruiert werden. Anwendung: **Reflexion & Brechung**.

Grundlagen: Brechungsindex

- Der Brechungsindex **n**, auch optische Dichte genannt, gibt an um welchen Faktor sich die Lichtgeschwindigkeit im Medium verringert.

$$n_i = \frac{c_0}{c_i}$$

- Für $n_1 < n_2$ gilt also $c_1 > c_2$.



Quelle: Wikipedia.de

Grundlagen: Strahlenoptik Fermatsches Prinzip

Im Bereich der geometrischen Optik gilt:

- Lichtstrahlen breiten sich in einem homogenen Medium geradlinig aus
- Der Lichtweg ist umkehrbar
- Lichtstrahlen sind voneinander unabhängig

⇒ **Prinzip von Fermat:** Ein Lichtstrahl durchläuft zwischen zwei Punkten P_1 und P_2 stets den Weg, für den die optische Weglänge einen Extremwert (Maximum oder Minimum) annimmt.

$$\delta \int_{P_1}^{P_2} n ds = 0$$

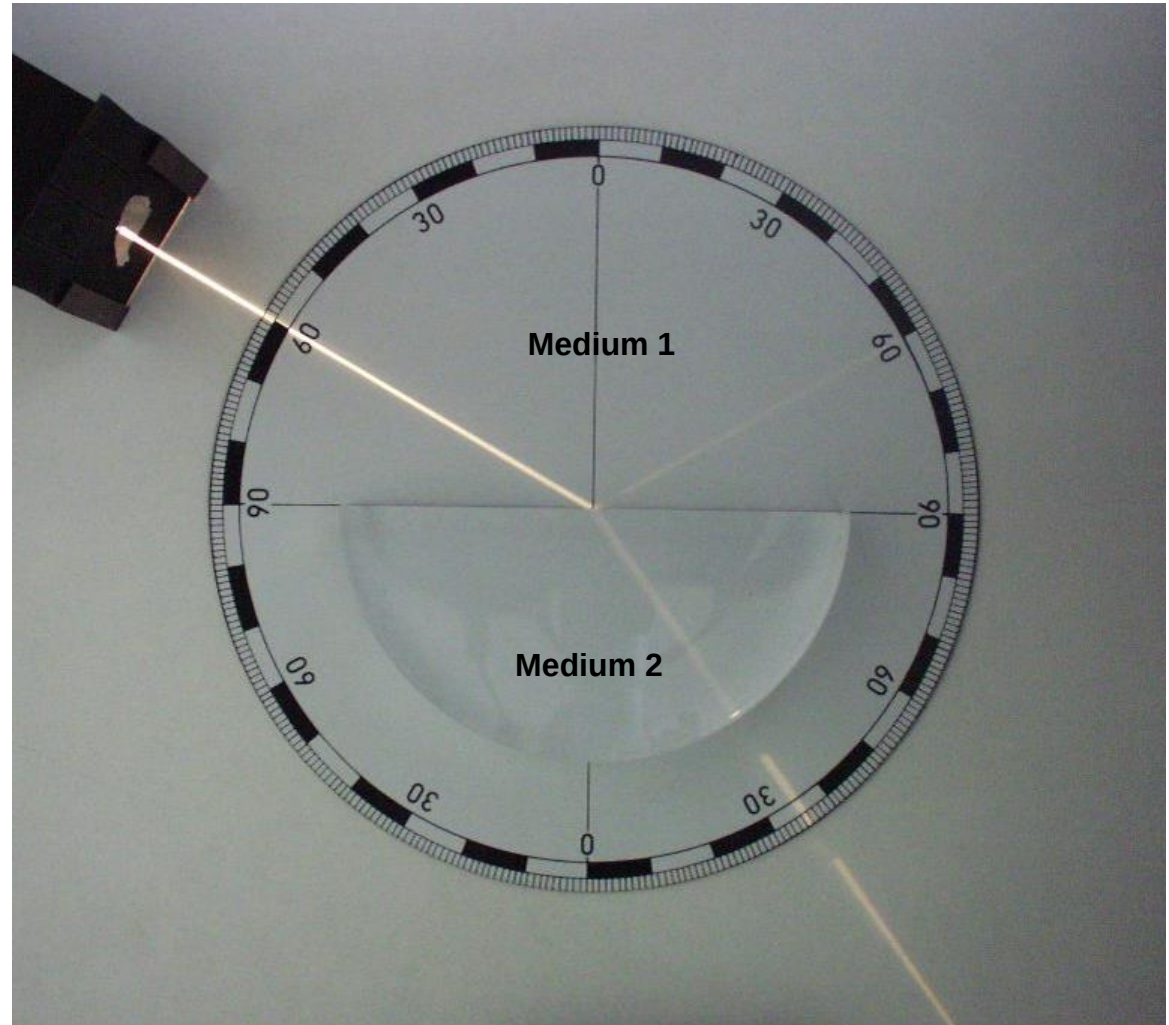
Das Fermatsche Prinzip ist aus Wellenoptik ableitbar → Siehe später

Inhalt

- Grundlagen
- Reflexion & Brechung
- Absorption
- Spiegel
- Prismen & Linsen
- Polarisation
- Beugung & Interferenz

Reflexion und Brechung

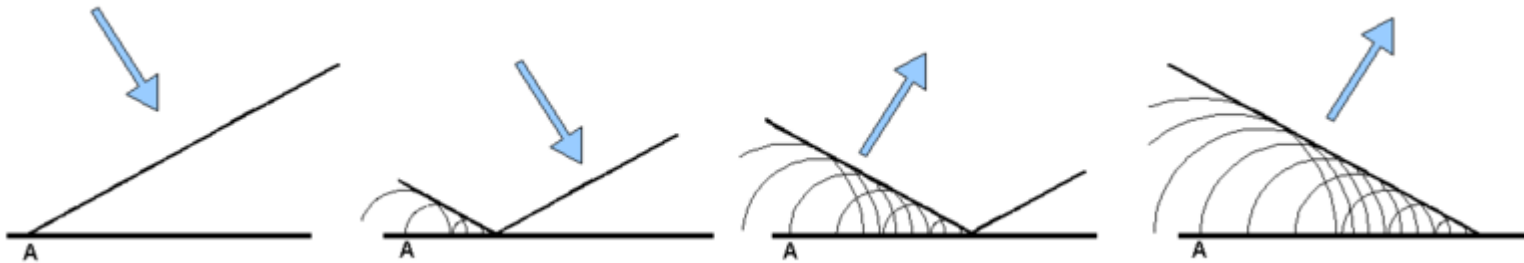
- Wie wird ein Teil des Lichtstrahls reflektiert?
- Wie wird ein Teil des Lichtstrahls gebrochen?
- Wie verhalten sich die Intensitäten zueinander?



Quelle: www.wikipedia.de

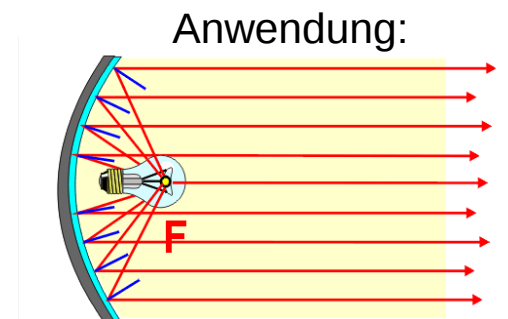
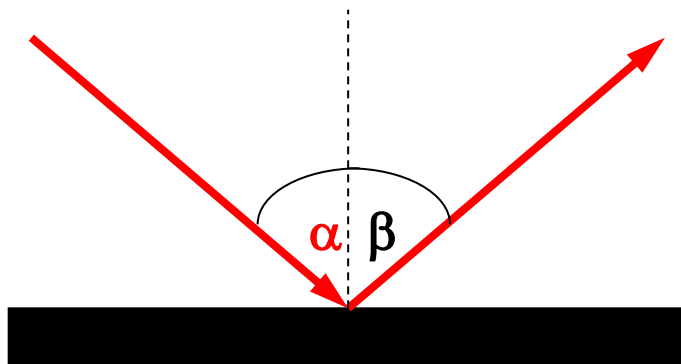
Reflexion

Aus der Sicht einer Wellenfront: Anwendung des Huygens Fresnel Prinzips führt zu einer neuen, reflektierten Wellenfront



Aus der Sicht eines Lichtstrahls:

$$\alpha = \beta$$

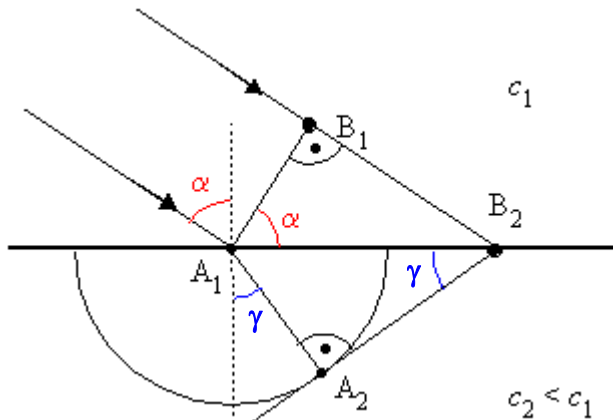


Brechung

Aus der Sicht einer Wellenfront:

Im optisch dichteren Material ist die Lichtgeschwindigkeit geringer.

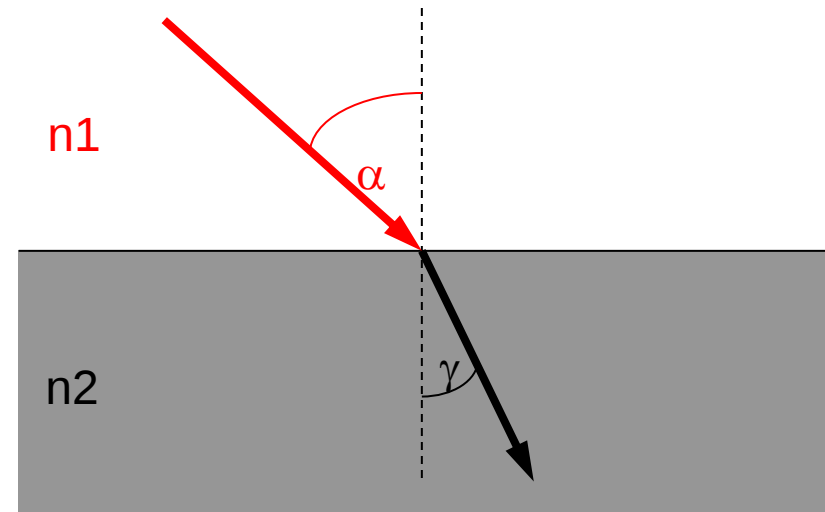
Deshalb „kippen“ die Wellenfronten im dichteren Material zum Lot hin.



$$\sin \alpha = \frac{[B_1 B_2]}{[A_1 B_2]} = \frac{c_1 \cdot \tau}{[A_1 B_2]}$$

$$\sin \gamma = \frac{[A_1 A_2]}{[A_1 B_2]} = \frac{c_2 \cdot \tau}{[A_1 B_2]}$$

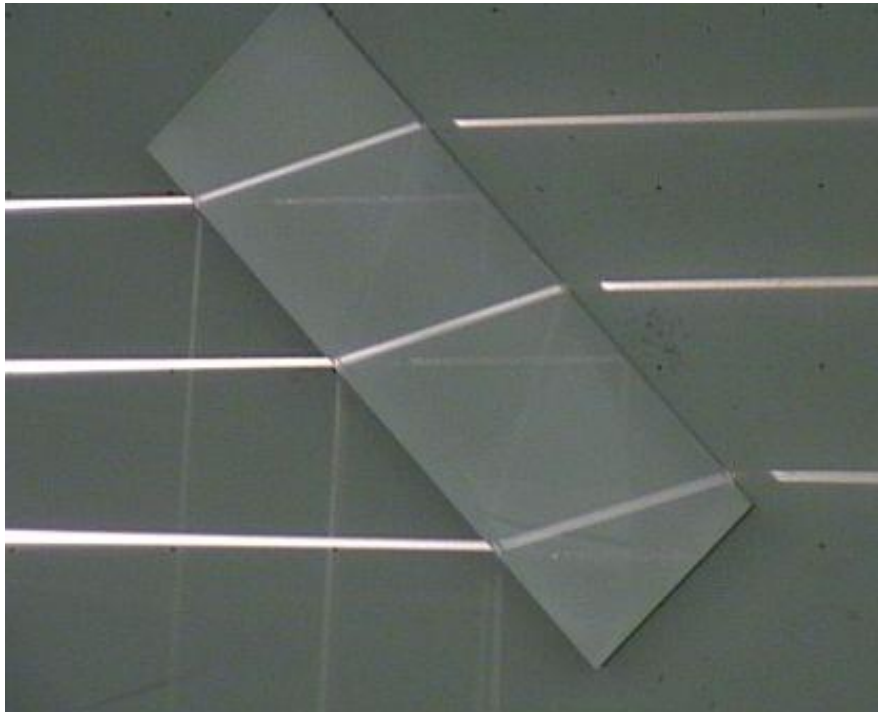
Aus der Sicht des Lichtstrahls:



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

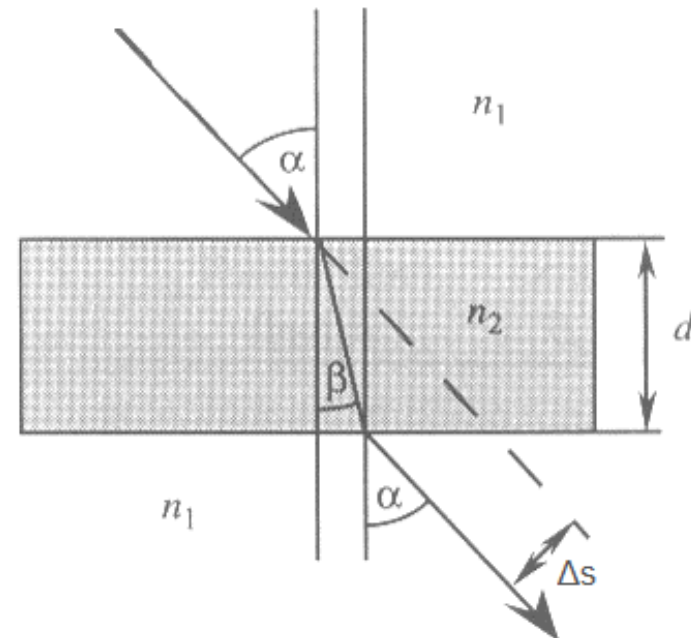
Brechung

Beim Durchgang durch eine planparallele Platte eines optisch dichteren Materials wird ein Lichtstrahl um Δs verschoben.



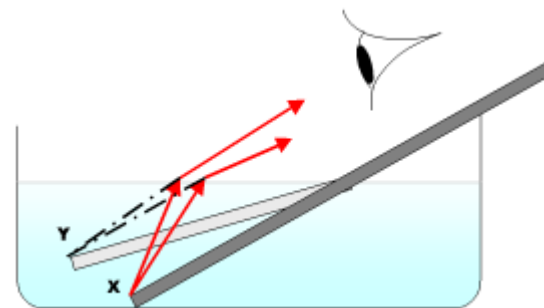
Quelle: www.physik.youteach.de,

$$\Delta s = \frac{d \cdot \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}$$



Quelle: www.haw.hamburg.de,

Brechung: Optische Hebung



Brechung: Optische Hebung

Neuere Experimente lassen auf die Irreversibilität der optischen Hebung schließen...

„Physics Teacher“ 13, 86 (Februar 1975)

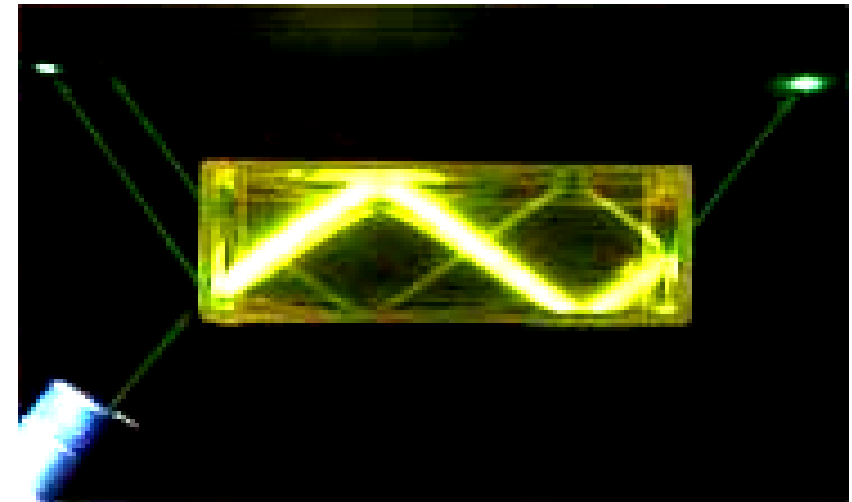
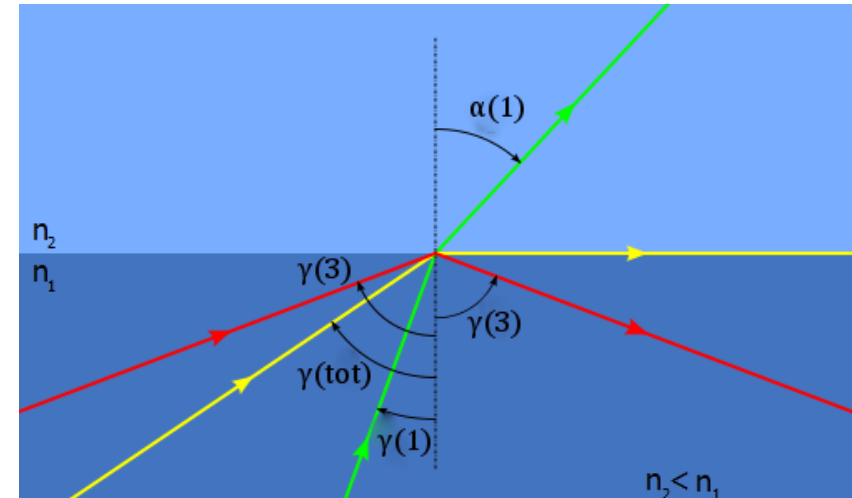
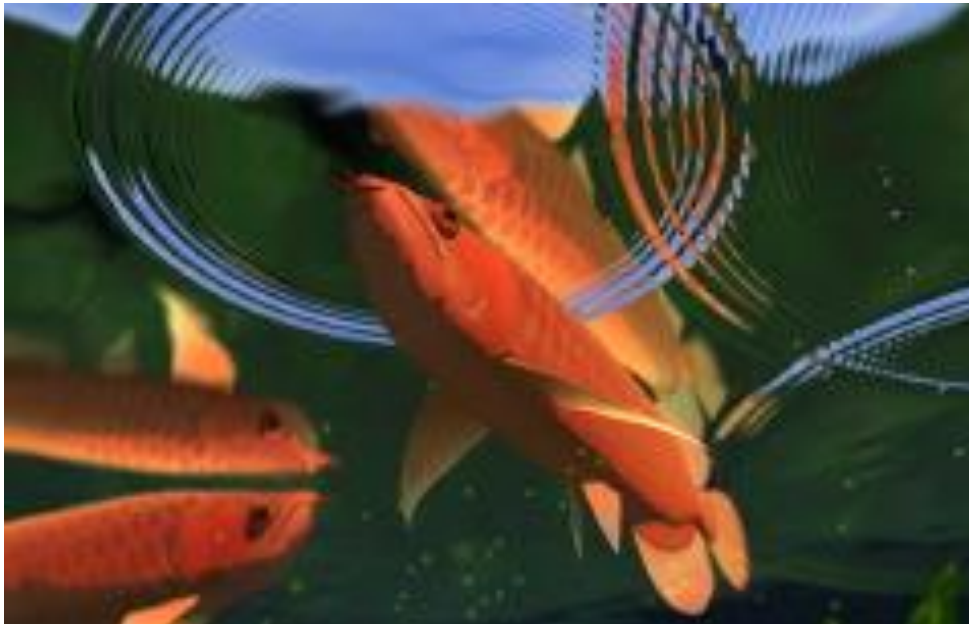


Brechung: Totalreflexion

Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium.

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \gamma_{tot}} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\gamma_{tot} = \arcsin \frac{n_1}{n_2} \xrightarrow{n_1=1; n_2=1,5} \gamma_{tot}(1,5) \approx 42^\circ$$

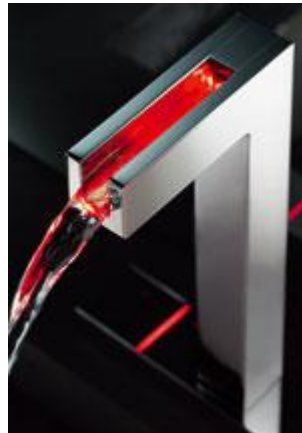


Anwendungen für Totalreflexion

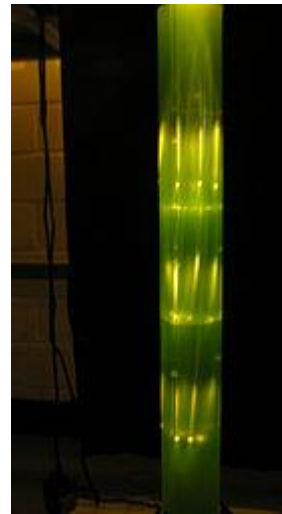
Mittels Totalreflexion kann man Licht durch einen transparenten Körper Leiten. Solche **Lichtleiter** werden vielfach als optische Systeme eingesetzt:



Quelle: www.wikipedia.de



Quelle: Hansa Metallwerke



Quelle: www.wikipedia.de



Quelle: Hama

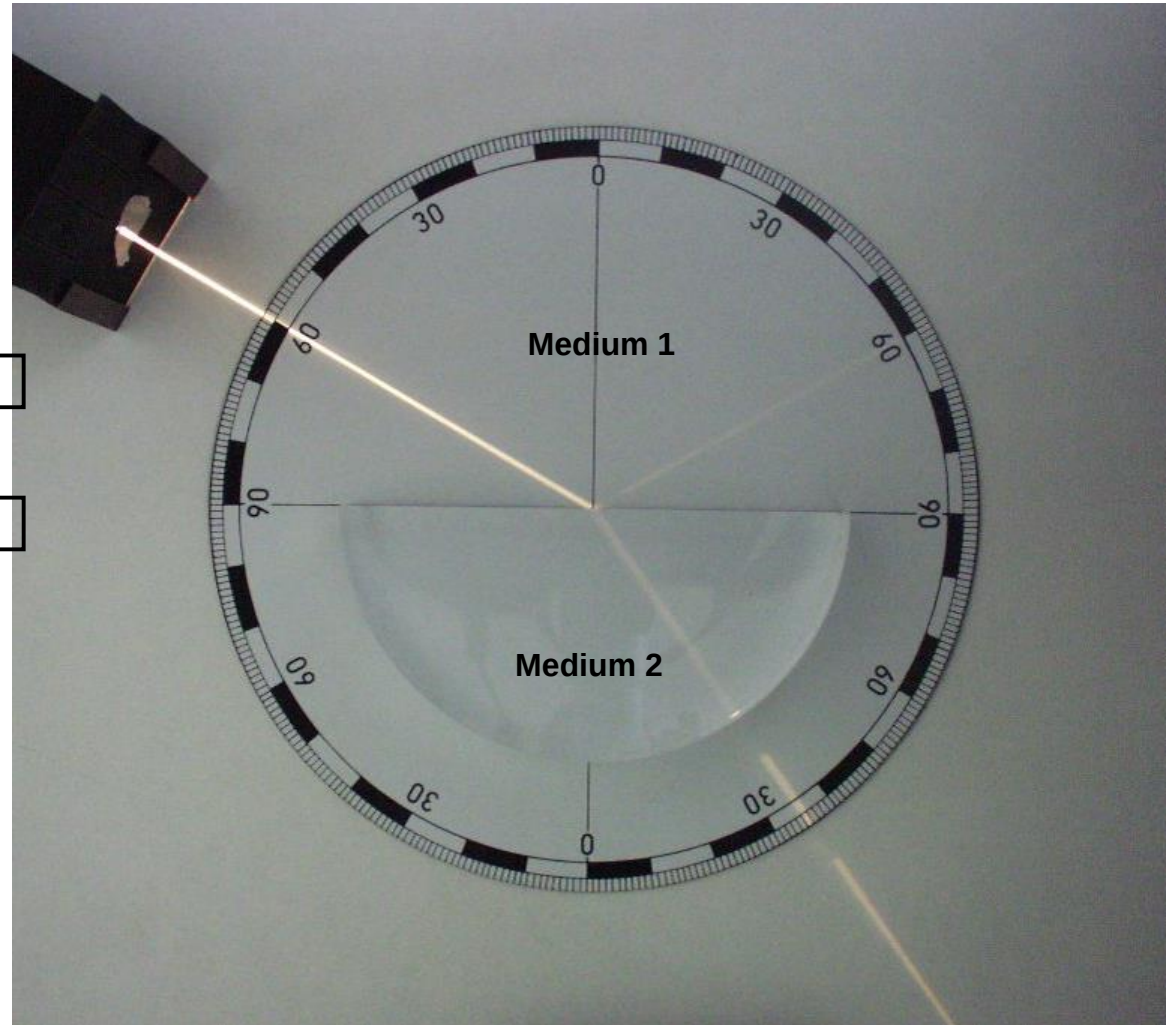


Quelle: Hella

Hierzu später
mehr!

Reflexion und Brechung

- Wie wird ein Teil des Lichtstrahls reflektiert? ✓ ☐
- Wie wird ein Teil des Lichtstrahls gebrochen? ✓ ☐
- Wie verhalten sich die Intensitäten zueinander?

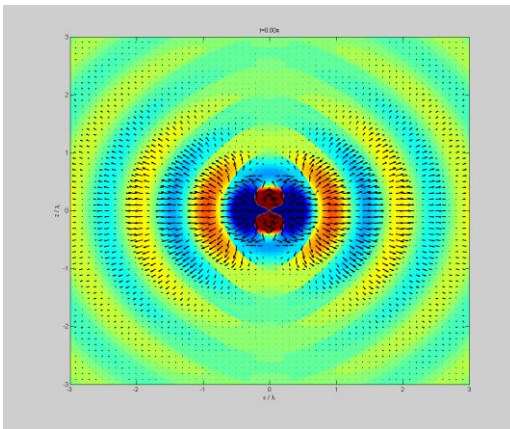


Quelle: www.wikipedia.de

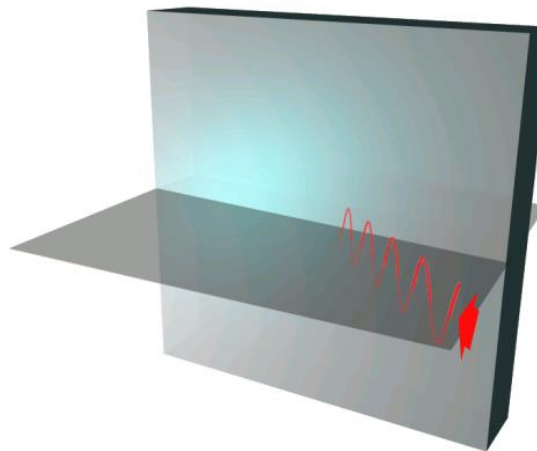
Die Fresnelschen Formeln

Bei der Transmission und Reflexion an der Grenzfläche eines transparenten Materials verhalten sich die unterschiedlichen Polarisationsrichtungen (des $\mathbf{E}$ Vektors) in Bezug auf die Einfallsebene unterschiedlich.

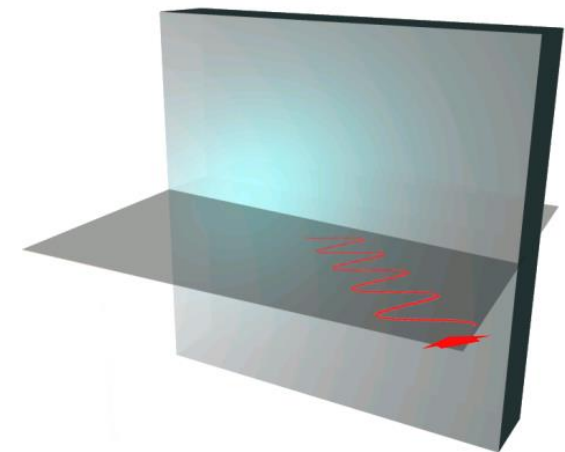
Physikalische Begründung: Einfallende Lichtwelle regt atomare „Elementardipole“ zu erzwungenen Schwingungen an. Die Hauptabstrahlrichtung ist in Richtung des gebrochenen Strahls. Die Amplitude des Reflektierten Strahles ist Abhängig vom Winkel zur Hauptabstrahlrichtung und Anregungsebene.



Quelle: www.wikipedia.de



senkrechte Polarisation: s / TE

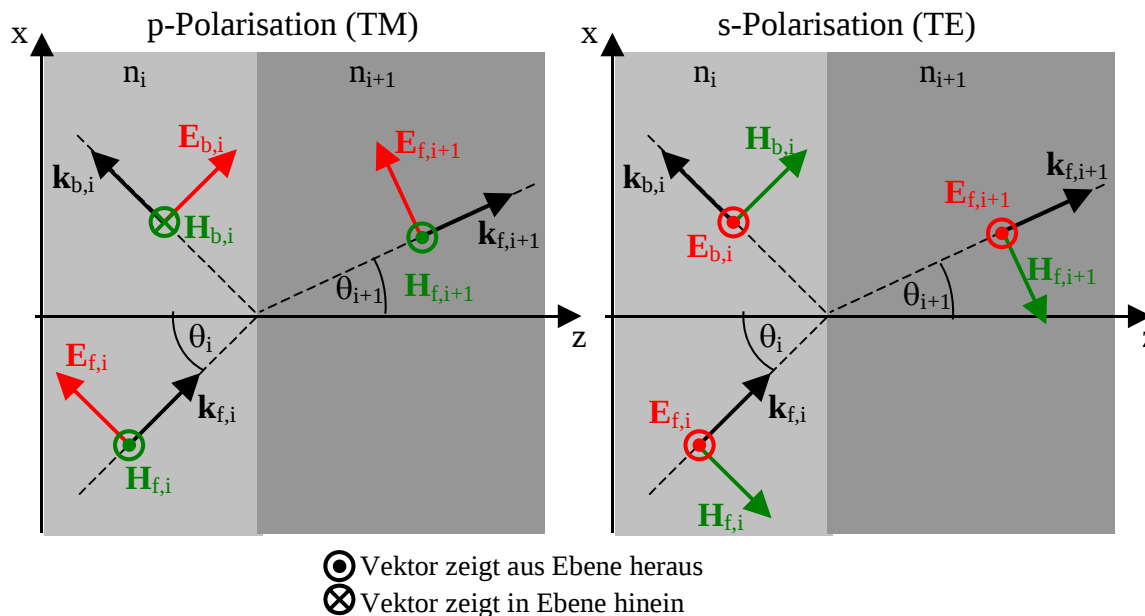


parallele Polarisation: p / TM

Die Fresnelschen Formeln

Durch eine längere Ableitung erhält man für den Reflexionsgrad (R) in Abhängigkeit vom Einfallswinkel und Brechungswinkel θ_1, θ_2 :

$$R_{\theta_1=0^\circ} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad R_{TE} = \left(\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right)^2 \quad R_{TM} = \left(\frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \right)^2$$



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

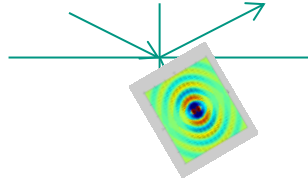
Der Transmissionsgrad ergibt sich dann aus:

$$T = 1 - R$$

(Verluste vernachlässigt)

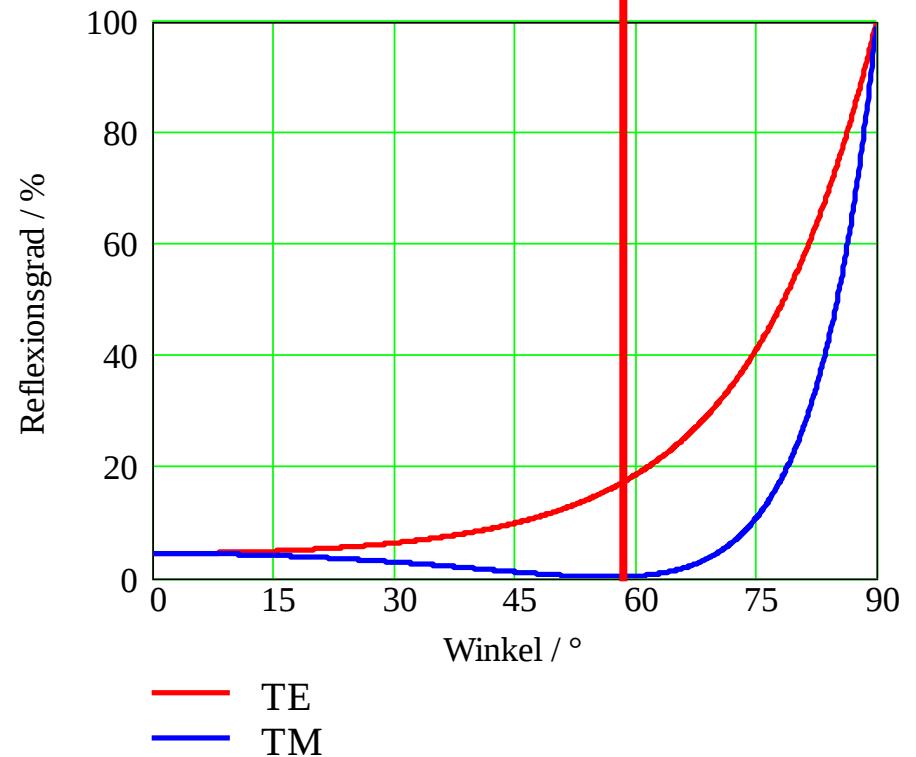
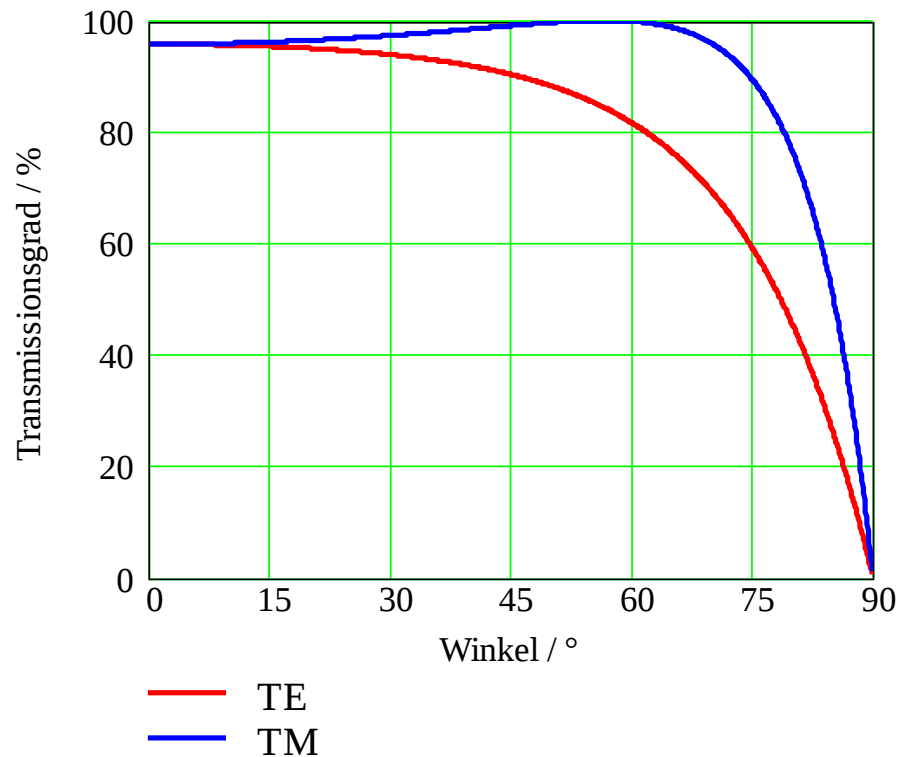
Die Fresnelschen Formeln

$n_{\text{Luft}} = 1$ und $n_{\text{Glas}} = 1,52$



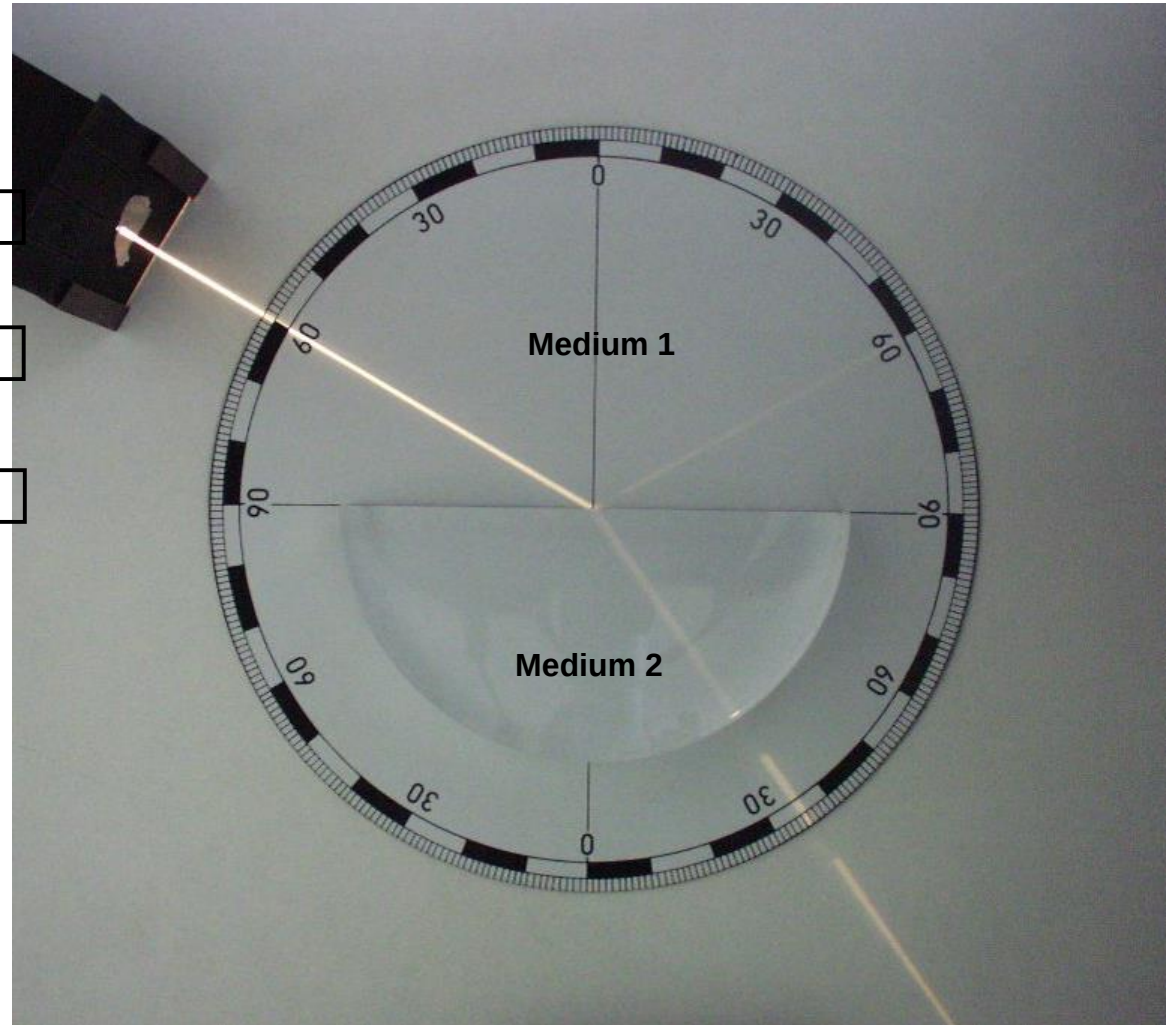
$$\theta_{1B} = \arctan \frac{n_2}{n_1}$$

Für die p-Polarisation gibt es einen Winkel, bei dem keine Reflexionsverluste auftreten → **Brewster Winkel** θ_{1B}



Absorption

- Wie wird ein Teil des Lichtstrahls reflektiert? ✓ ☐
- Wie wird ein Teil des Lichtstrahls gebrochen? ✓ ☐
- Wie verhalten sich die Intensitäten zueinander? ✓ ☐
- Was geschieht innerhalb des Mediums



Quelle: www.wikipedia.de

Absorption: Beer Lambert Gesetz

Innerhalb eines Mediums kann Licht auch absorbiert werden.

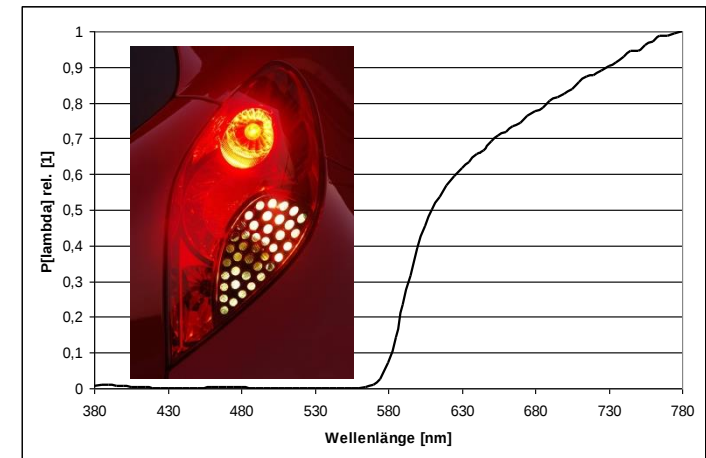
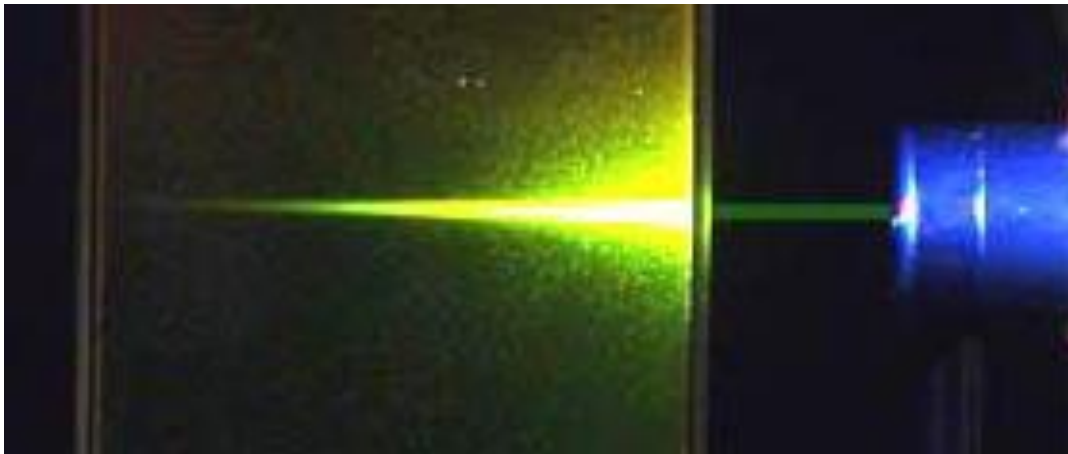
Ist die Absorption im Medium homogen, so wird beim Durchtritt auf jedem infinitesimalen Längenstück die gleiche Menge Licht absorbiert:

$$dI = -\alpha(\lambda) \cdot I \cdot dl$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\alpha(\lambda) \int_0^l dl \Rightarrow \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\alpha(\lambda) \cdot l$$

$$I(l, \lambda) = I_0 e^{-\alpha(\lambda)l}$$

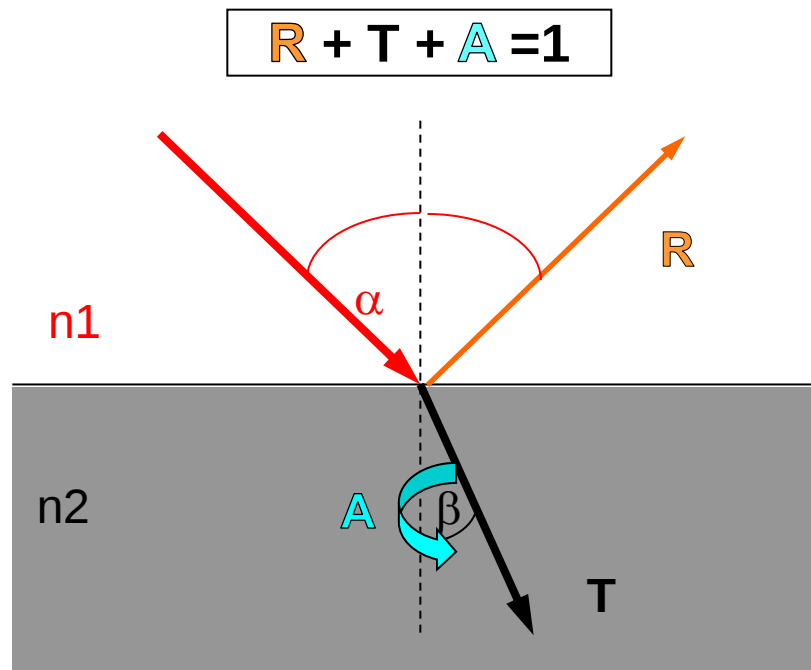
Anwendung:



Quellen: PSA, Hella

Reflexion, Transmission & Absorption

Aus der Energieerhaltung folgt, dass die Summe aus reflektierter, transmittierter und absorbiertem Lichtintensität der Intensität des einfallenden Lichtes entsprechen muss. Die Summe der entsprechenden Koeffizienten (**R**eflexionsgrad, **T**ransmissionsgrad und **A**bsorptionsgrad) beträgt Eins.



Die grundlegenden Gesetze der Strahlenoptik

- Reflexionsgesetz:

$$\alpha = \beta$$

- Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

- Beer-Lambert:

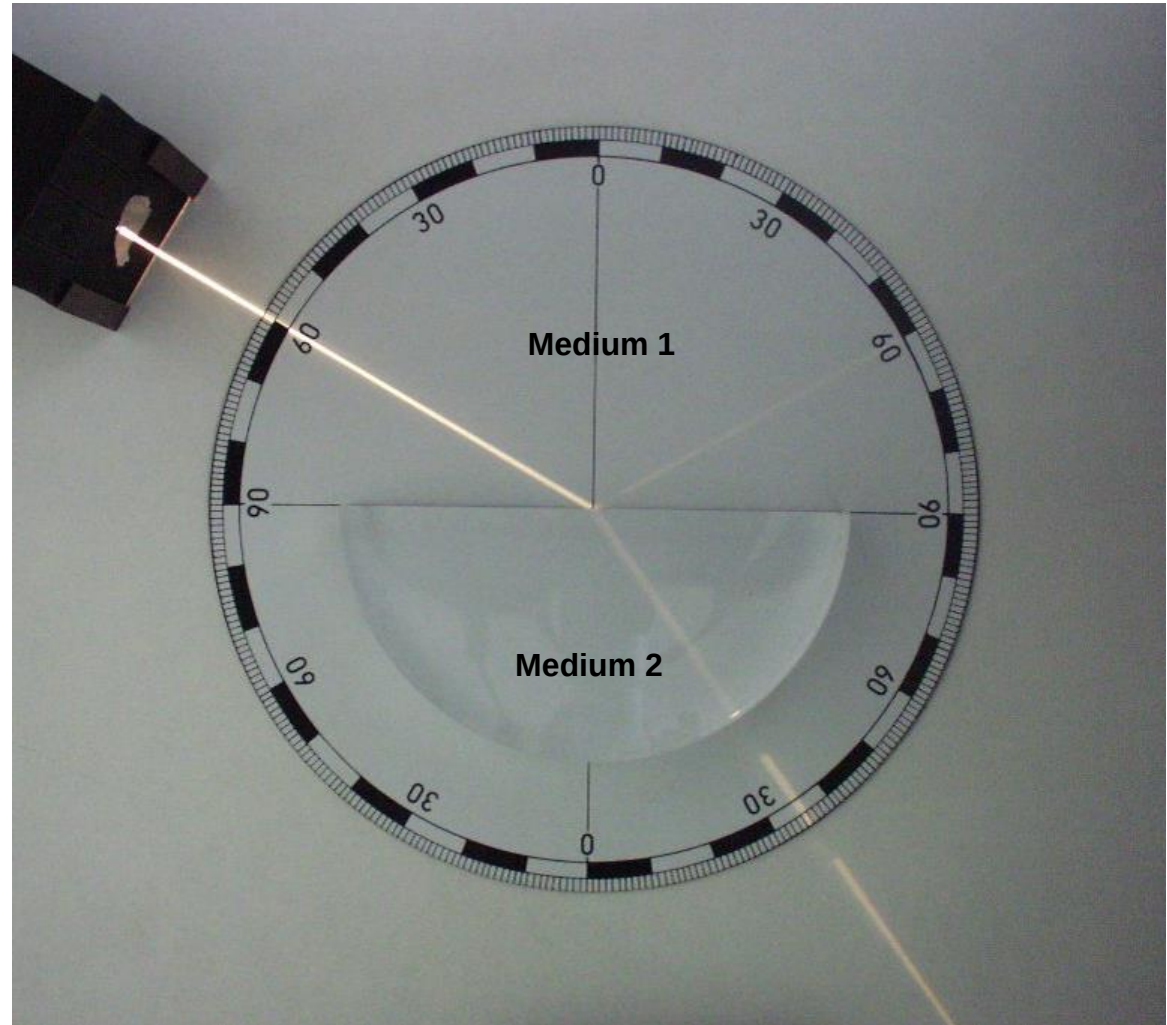
$$I(l, \lambda) = I_0 e^{-\alpha(\lambda)l}$$

- Fresnel Formeln:

$$R_{TE} = \left(\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right)^2 \quad R_{TM} = \left(\frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \right)^2$$

- Energieerhaltung:

$$R + T + A = 1$$



Quelle: www.wikipedia.de

Inhalt

- Grundlagen
- Reflexion & Brechung
- Absorption
- Spiegel
- Prismen & Linsen
- Beugung & Interferenz

Spiegel

„Spieglein Spieglein an der Wand...“

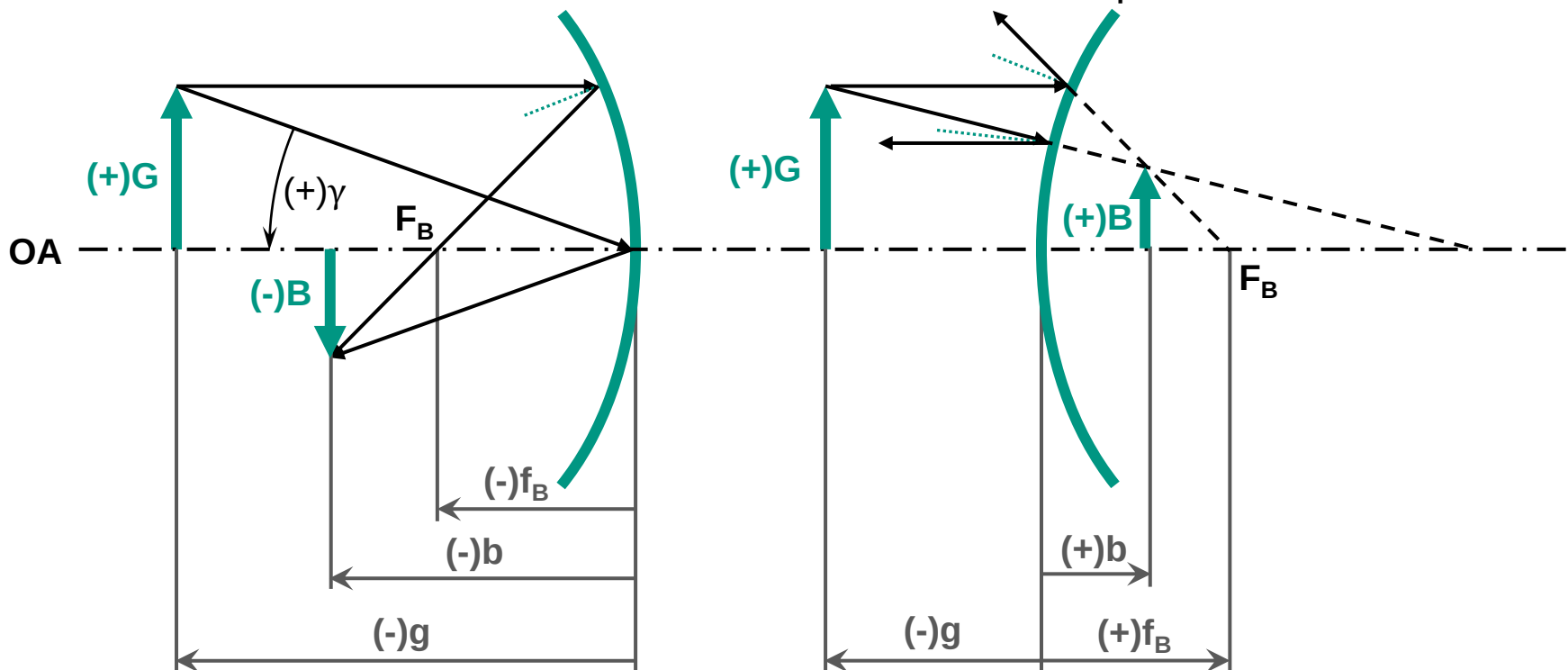


Quelle: Disney

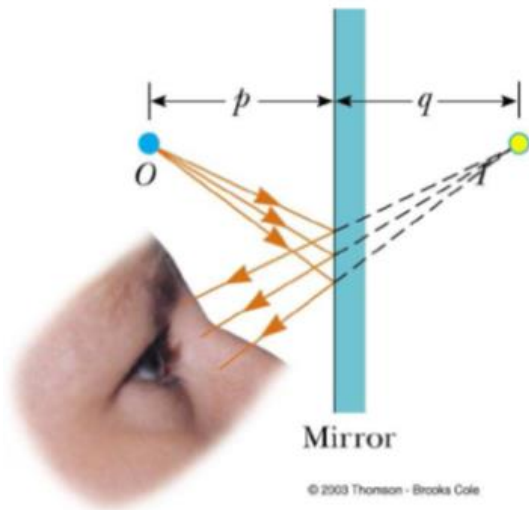
Die physikalische Wirkungsweise eines Zauberspiegels ist bislang nur unzureichend untersucht. Daher werden hier nur ebene Spiegel und gebogene Spiegelflächen betrachtet!

Vorzeichenkonvention: Spiegel

- Verwendete Vorzeichenkonvention für Spiegel in dieser Vorlesung
 - Gemessen wird immer vom optischen Element
 - Nach links: Negativ
 - Nach rechts: Positiv
 - Winkel sind mathematisch Positiv von Strahl zur optischen Achse definiert



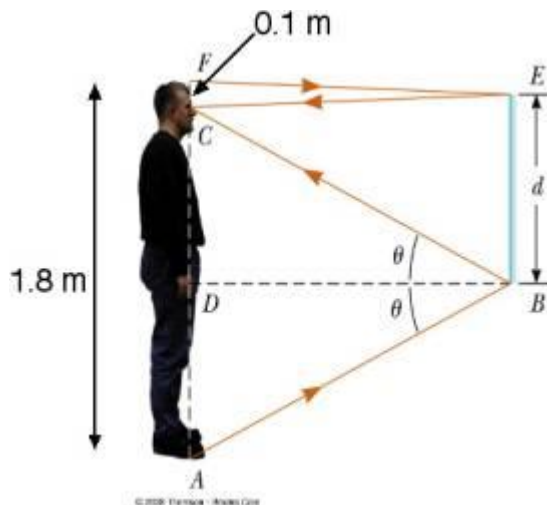
Ebener Spiegel



Ein ebener Spiegel erzeugt ein **virtuelles** Bild „hinter dem Spiegel“.

Dieses Bild ist Längen- und Wirklichkeitsgetreu, oben & unten, rechts & links werden **richtungsgetreu** abgebildet.

Die Abbildung erscheint für den Beobachter „spiegelverkehrt“, da die Vorderseite mit der Rückseite vertauscht wird.

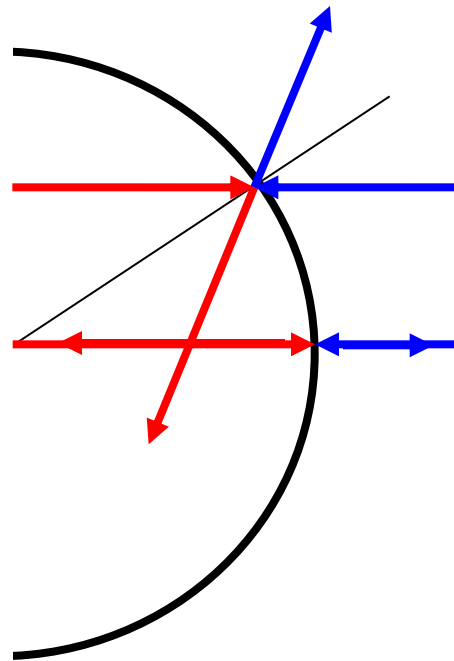


Quelle: www.physics.uk.edu

Hohl- und Wölbspiegel

Durch die Krümmung von Spiegelflächen werden die Normalen auf der Oberfläche winklig zusammengezogen (Hohlspiegel) oder auseinandergezogen (Wölbspiegel). Dadurch wird das Licht konzentriert bzw. zerstreut.

Hohlspiegel
-Konzentrierend

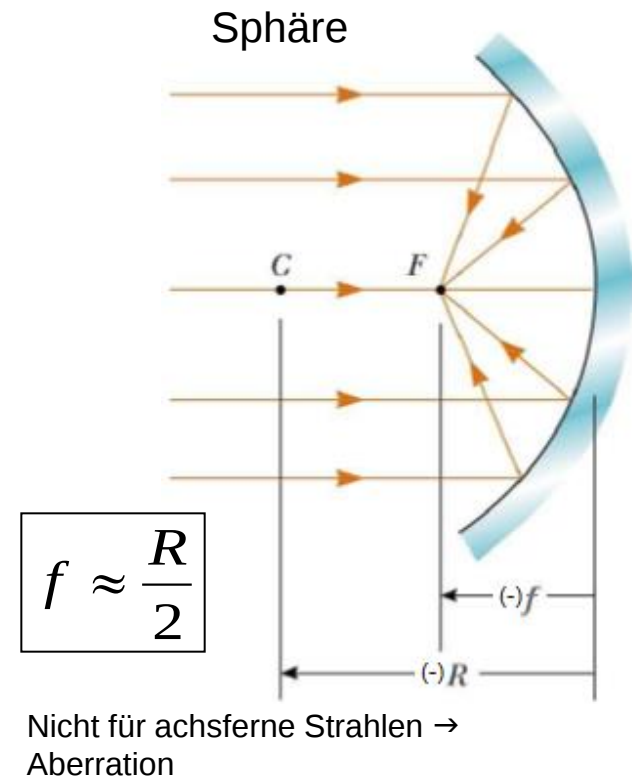
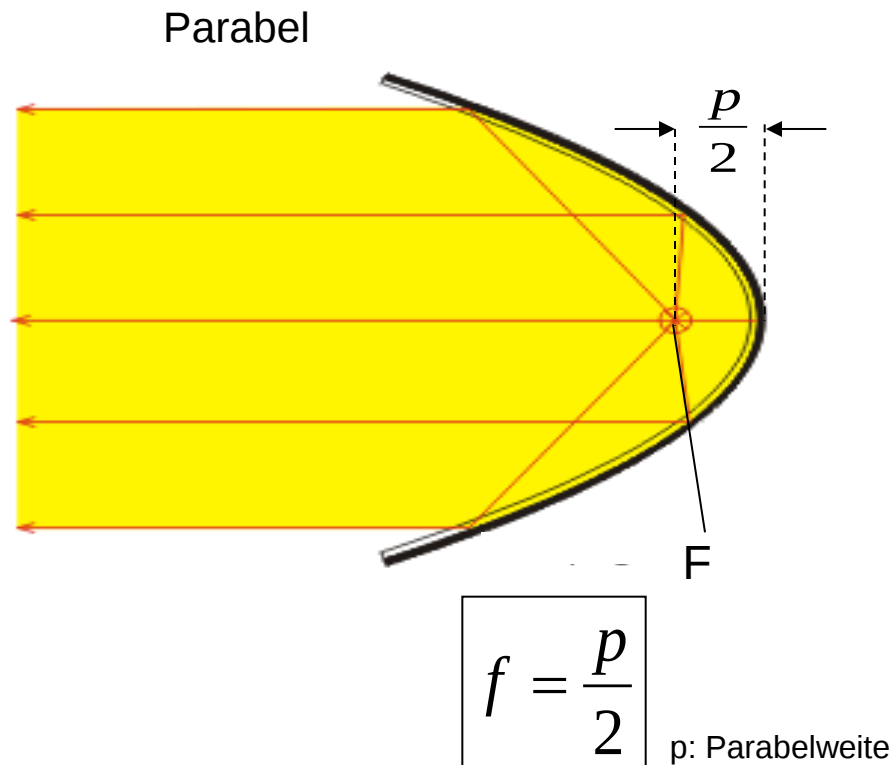


Wölbspiegel
-Zerstreuend

Hohl- und Wölbspiegel: Sphäre und Parabel

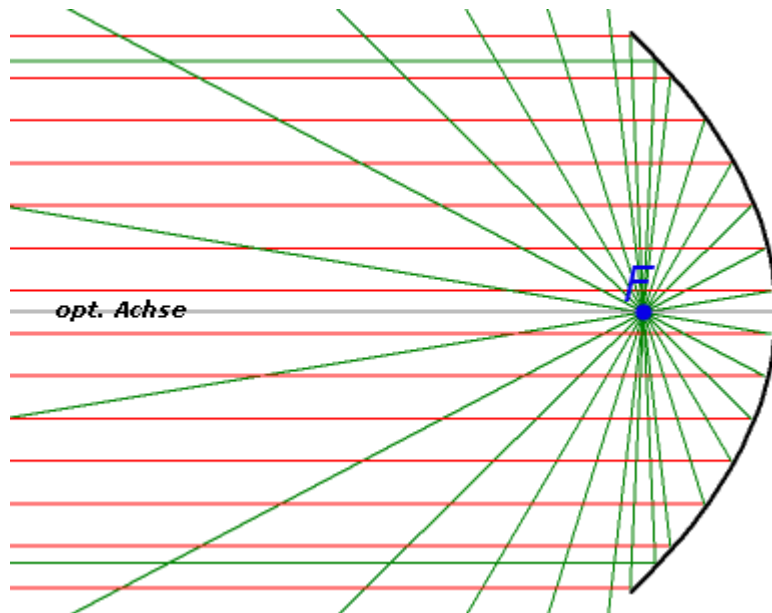
Der **Brennpunkt** oder **Fokus** ist der Punkt, in dem parallel einfallendes Licht gebündelt erscheint. Man unterscheidet reelle und virtuelle Foki.

Für einfache geometrische Formen lässt sich der Brennpunkt einfach ableiten:

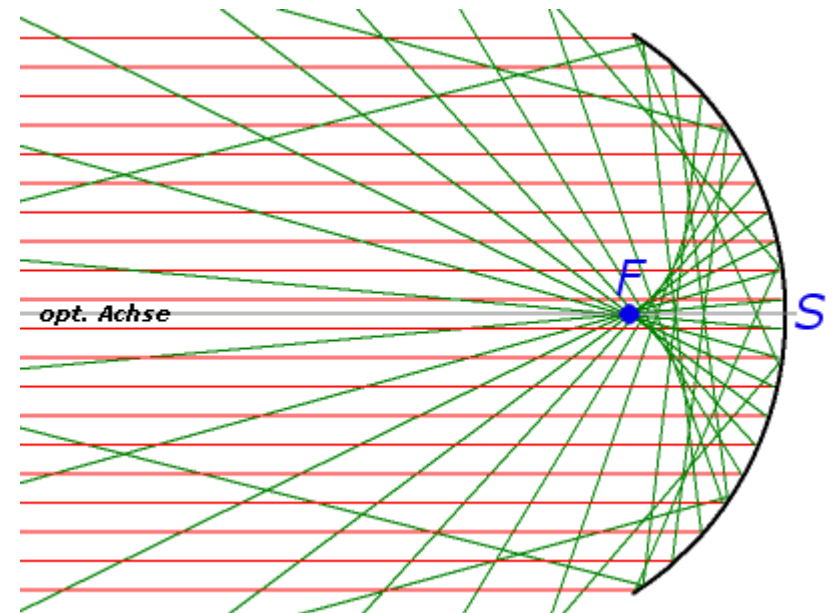


Sphärischer Spiegel

Während die Parabel (oder das Rotationsparaboloid) per Definition parallele Strahlen im Brennpunkt bündelt, gilt dies bei der Sphäre (oder Kugelschale) nur näherungsweise. Für achsferne Strahlen tritt hier ein **geometrischer Abbildungsfehler / Aberration** auf $\Rightarrow$ **Kaustik**:



Parabolisch



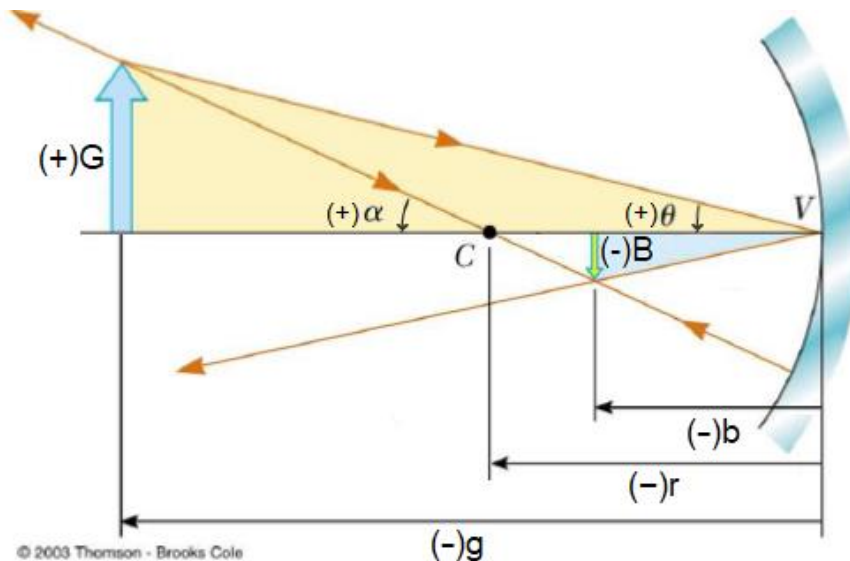
Spärisch

Quelle: www.chemgapedia.de

Sphärischer Spiegel

Die **Bildkonstruktion** kann durch beliebige Strahlen durchgeführt werden. $\Rightarrow$ Beste Wahl: Brennpunkt- und Parallelstrahl oder Mittelpunktstrahl und Hauptachsenstrahl.

Bei Reflexion wird der Brennpunktstrahl parallel ausgerichtet und der Parallelstrahl wird durch den Brennpunkt geführt, der Mittelpunktstrahl wird in sich selbst reflektiert.



Quelle: www.physics.uk.edu

$$\tan \alpha = \frac{G}{g} = \frac{-B}{b}$$

$\Rightarrow$ Vergrößerung M:

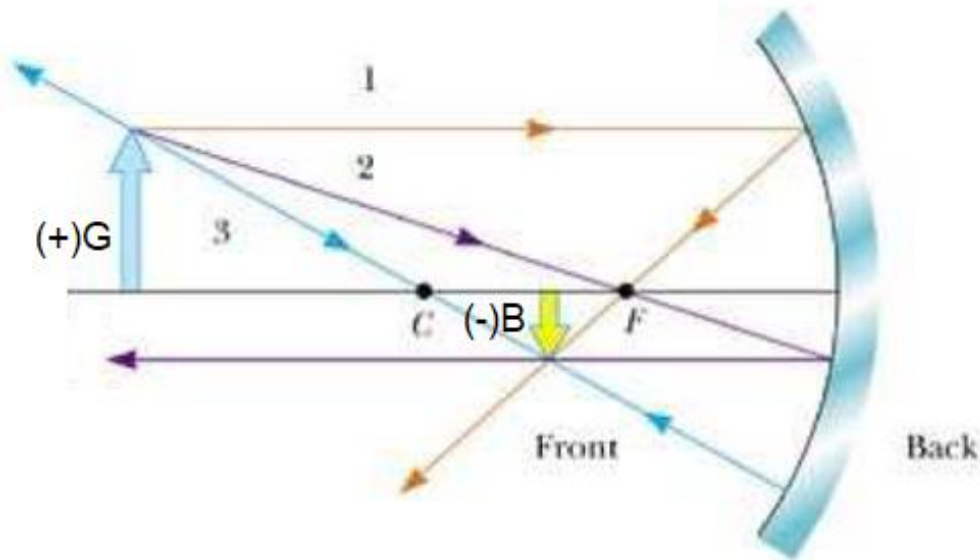
$$M = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g}$$

Aus Konstruktion Brennpunkt- / Parallelstrahl leitet man ab:

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

Sphärischer Spiegel

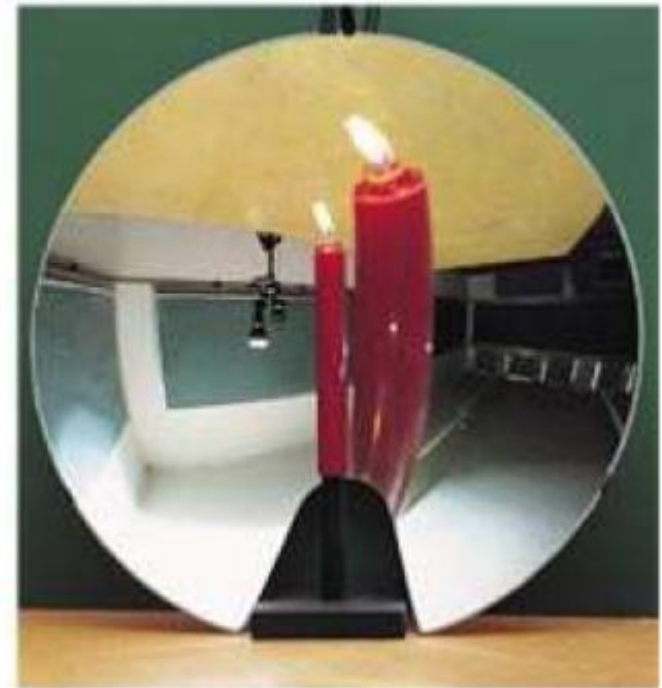
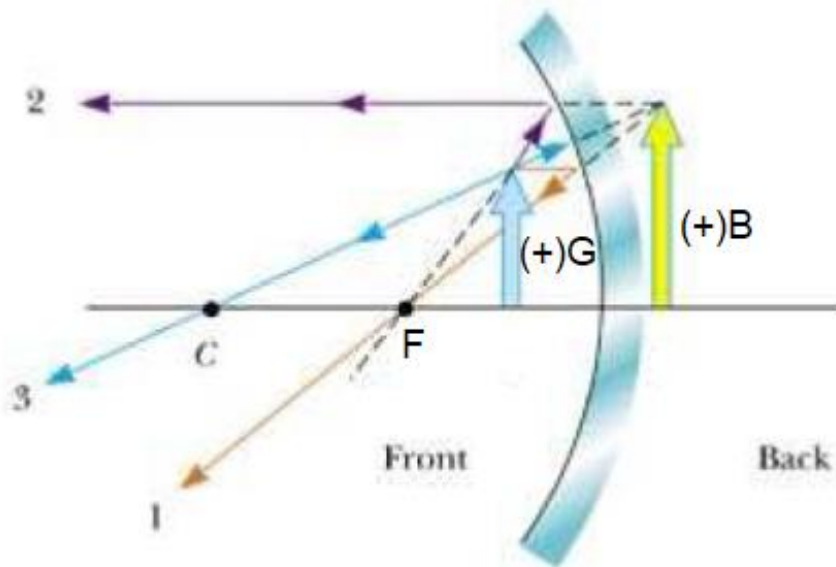
Hohlspiegel 1: Ist der Gegenstand außerhalb der Brennweite positioniert, entsteht ein verkleinertes, reales und seitenvertauschtes Bild:



Quelle: www.physics.uk.edu

Sphärischer Spiegel

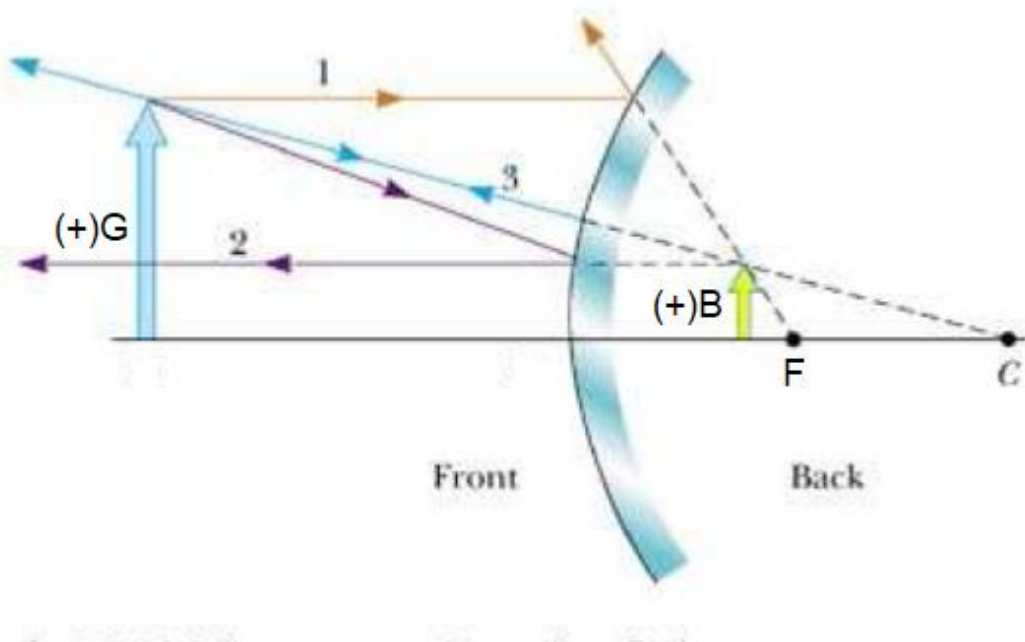
Hohlspiegel 2: Ist der Gegenstand innerhalb der Brennweite positioniert, entsteht ein vergrößertes, virtuelles und seitenrichtiges Bild:



Quelle: www.physics.uk.edu

Sphärischer Spiegel

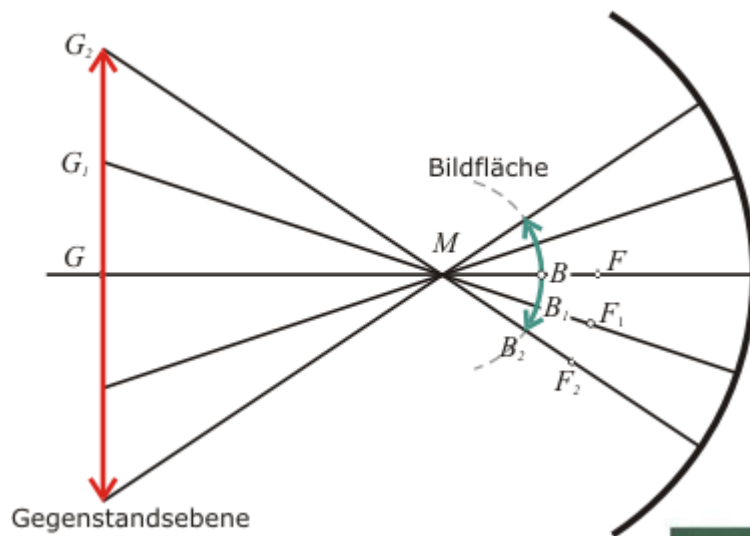
Wölbspiegel: Der Gegenstand ist immer außerhalb der Brennweite positioniert. Es entsteht ein verkleinertes, virtuelles und seitenrichtiges Bild:



Quelle: www.physics.uk.edu

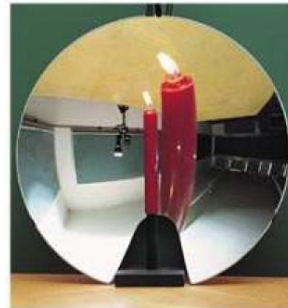
Sphärischer Spiegel

Neben der geometrischen Abberation tritt für ausgedehnte Objekte noch ein zusätzlicher **Wölbungsfehler** auf:



Quelle: www.chemgapedia.de

Die Bildpunkte befinden sich nicht mehr auf einer Geraden, sondern auf einer gekrümmten Linie. Je achsferner der Gegenstand ausgedehnt ist, um so stärker der Wölbungsfehler.



Inhalt

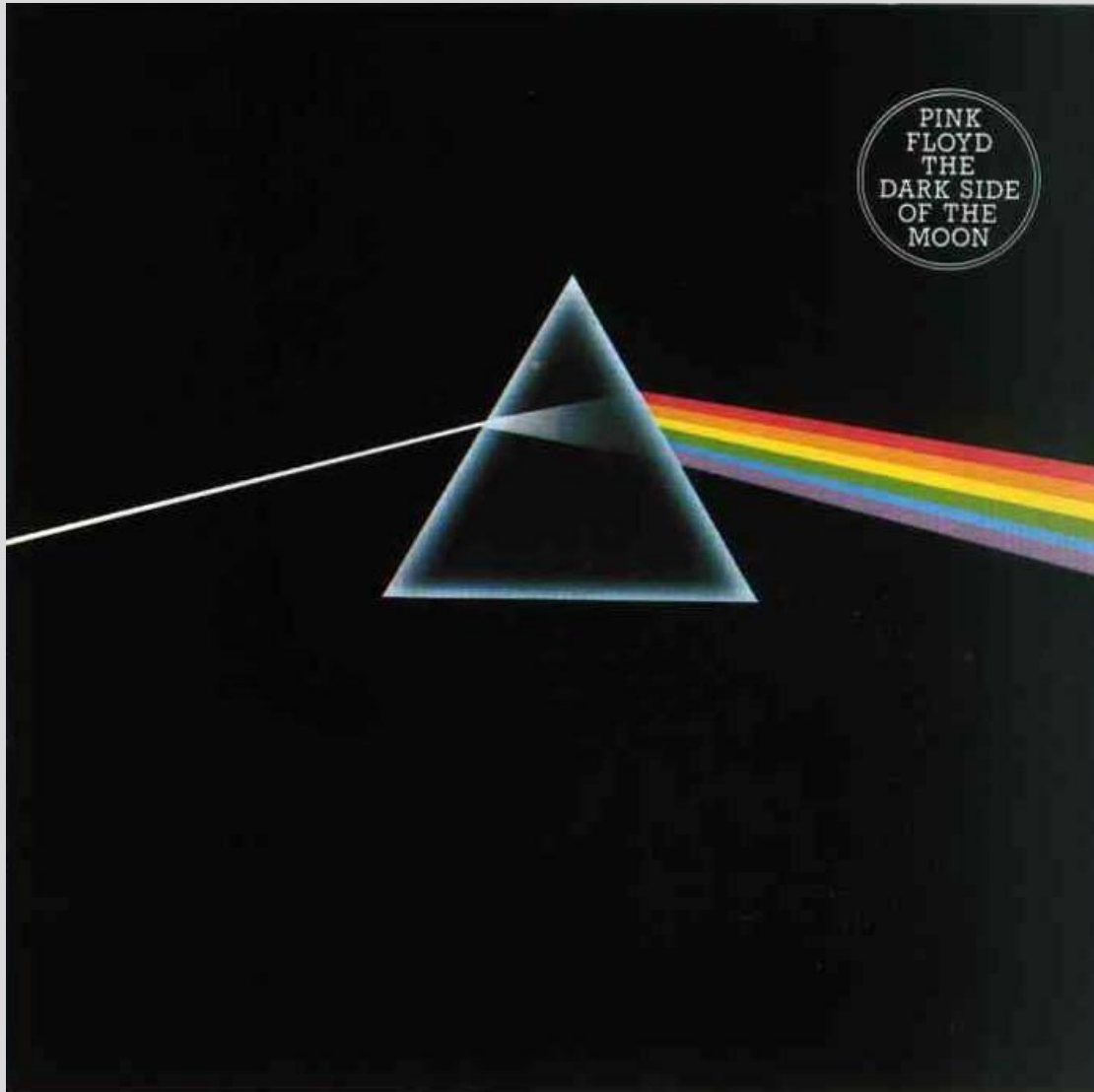
- Grundlagen
- Reflexion & Brechung
- Absorption
- Spiegel
- Prismen & Linsen
- Beugung & Interferenz

Prismen und Linsen



Quelle: www.nattmann.de

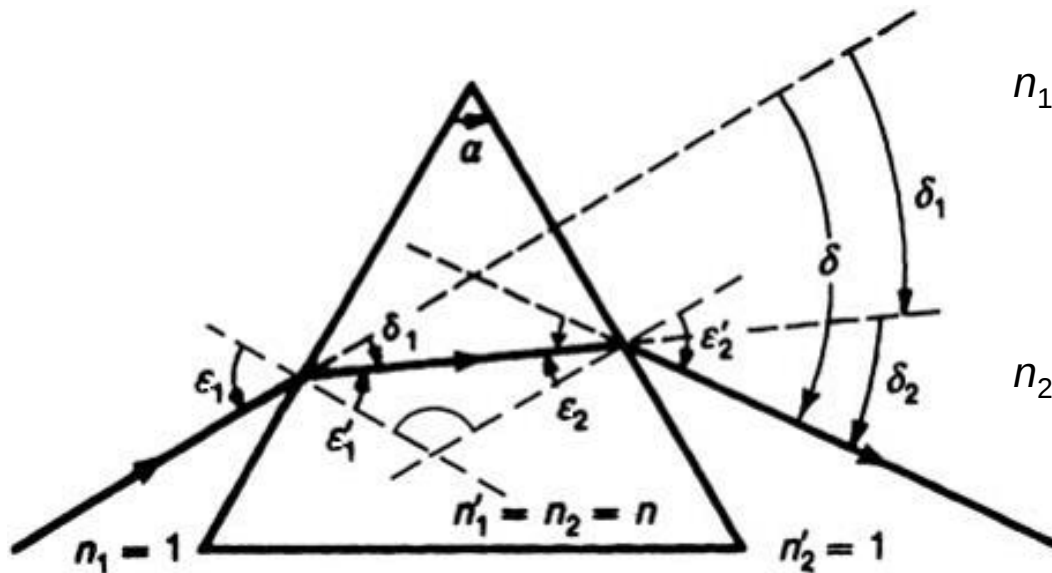
Prismen



Quellen: EMI, www.wikipedia.org

Wirkungsweise eines brechenden Prismas

Lichtablenkung symmetrisches Prisma mit zwei Grenzflächen



$$n_1 \sin \varepsilon_1 = n'_1 \sin \varepsilon'_1 \quad / \quad n_1 = 1, \quad n'_1 = n$$

$$\Rightarrow \sin \varepsilon_1 = n \sin \varepsilon'_1$$

$$n_2 \sin \varepsilon_2 = n'_2 \sin \varepsilon'_2 \quad / \quad n_2 = n, \quad n'_2 = 1$$

$$\Rightarrow n \sin \varepsilon_2 = \sin \varepsilon'_2$$

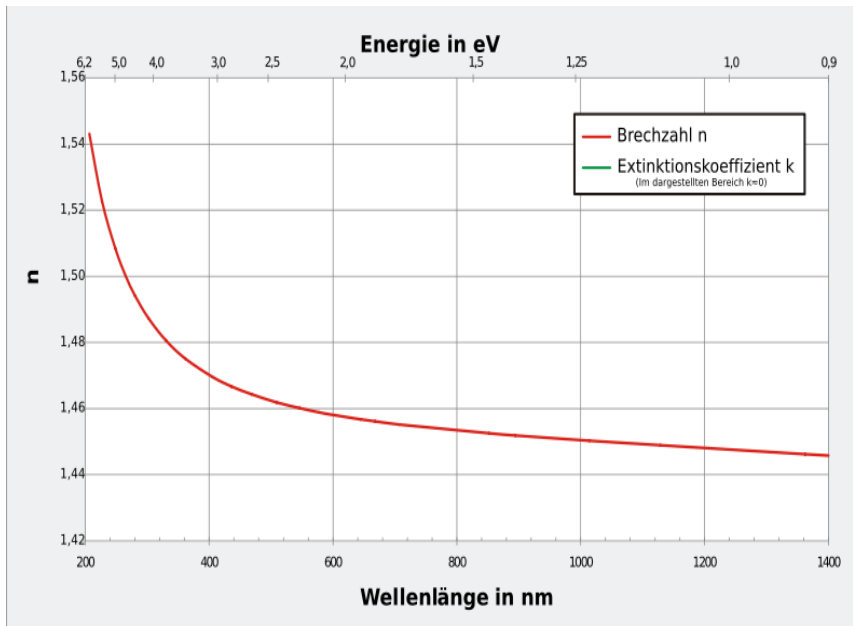
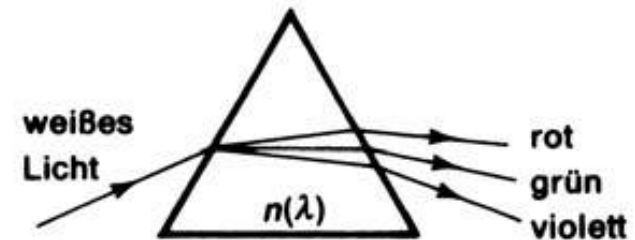
$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \alpha + \varepsilon_2 - \varepsilon_1$$

$$= \alpha - \varepsilon_1 + \arcsin(\cos \alpha \sin \varepsilon_1 - \sqrt{n^2 - \sin^2 \varepsilon_1} \cdot \sin \alpha)$$

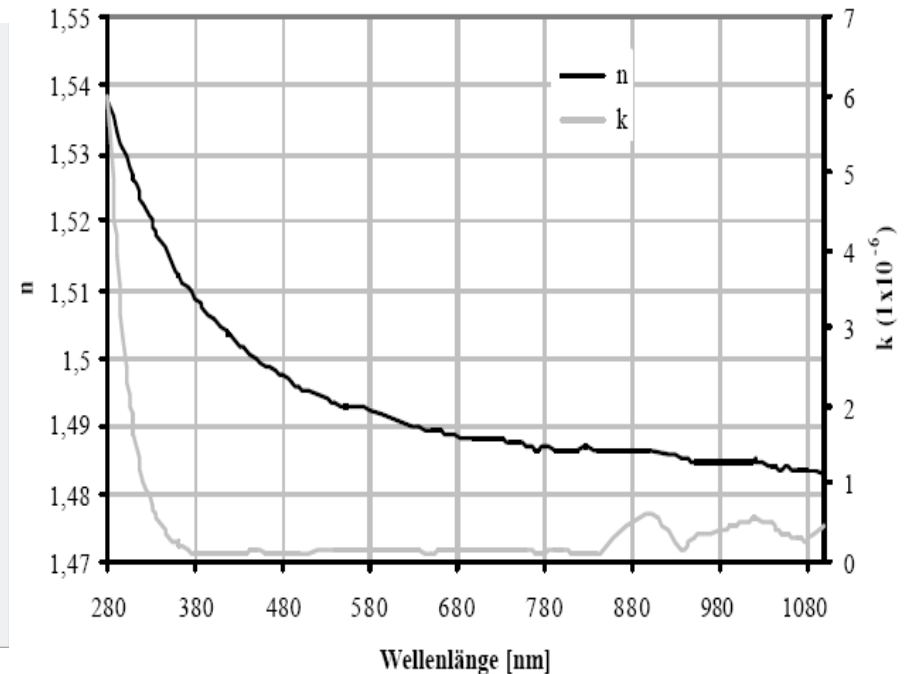
Abhängigkeit des Brechungsindex

Spektrale Aufspaltung Veränderung der Ablenkung im Prisma durch $n(\lambda)$

Alle optisch transparenten Stoffe weisen diese Abhängigkeit auf

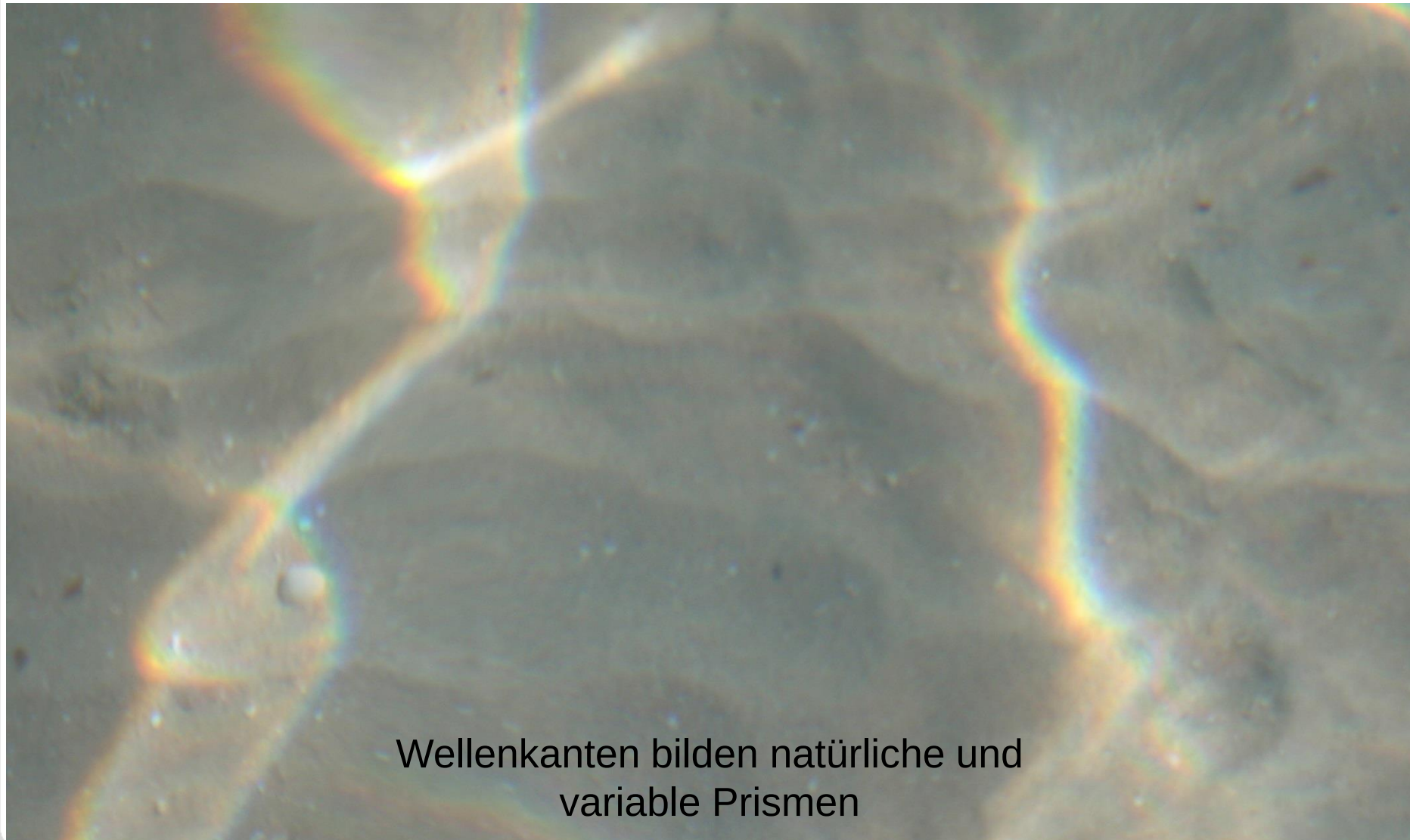


Siliciumdioxid
(Hauptbestandteil aller Quarz-Gläser)



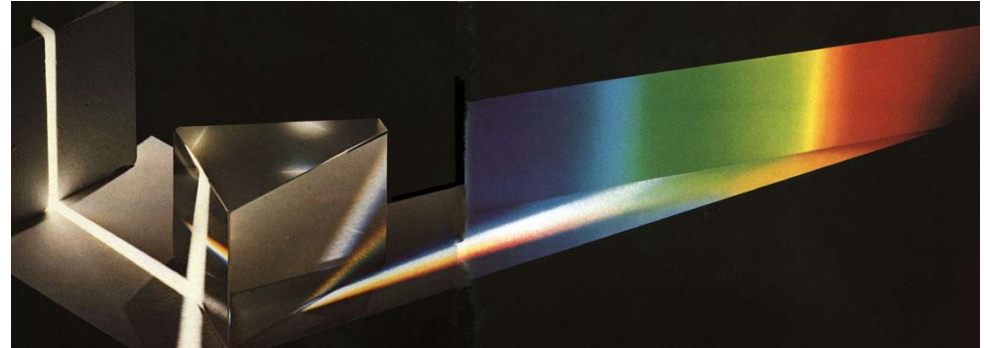
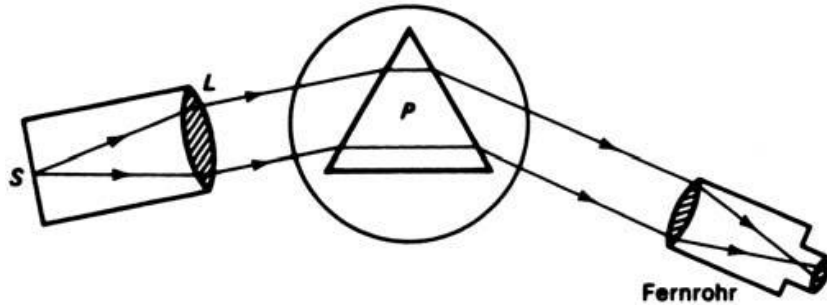
PMMA
(„Plexiglas“)

Abhängigkeit des Brechungsindex

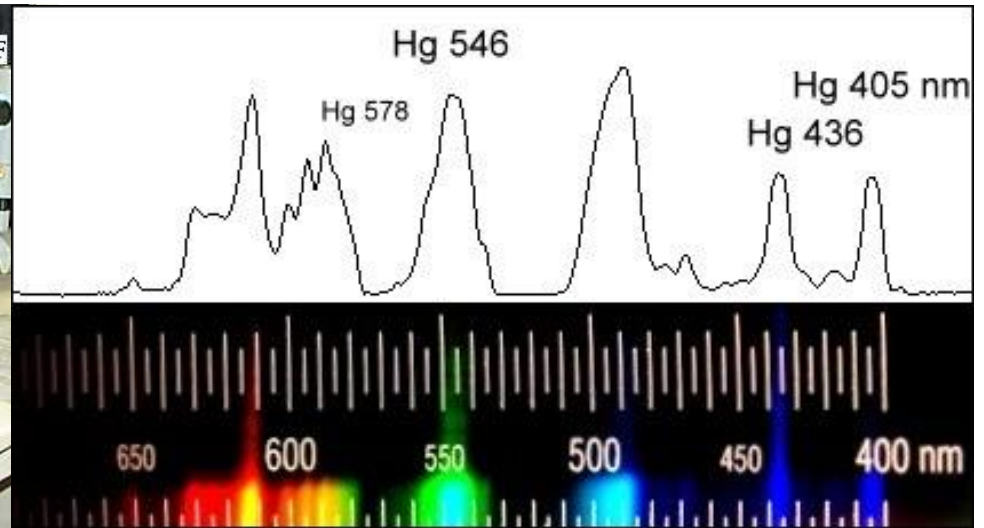


Wellenkanten bilden natürliche und
variable Prismen

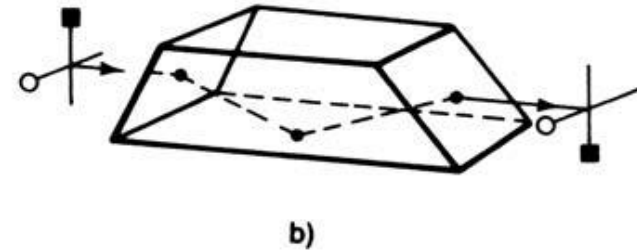
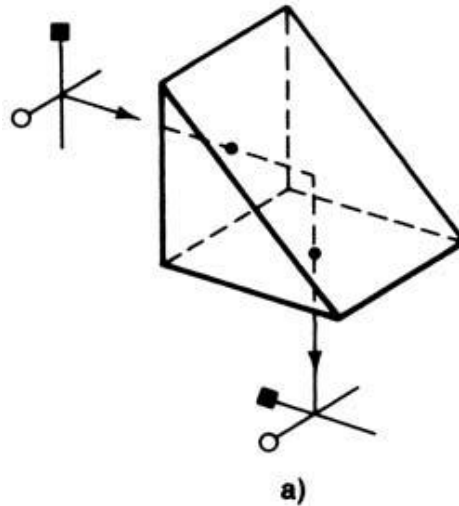
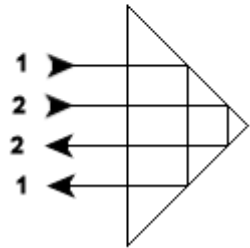
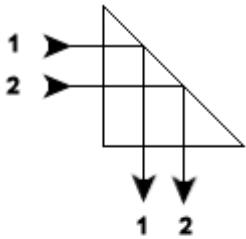
Anwendung: Prismenspektrometer



Labora Aufbau und beispielhafte Messung für eine Leuchtstofflampe



Totalreflexionsprismen

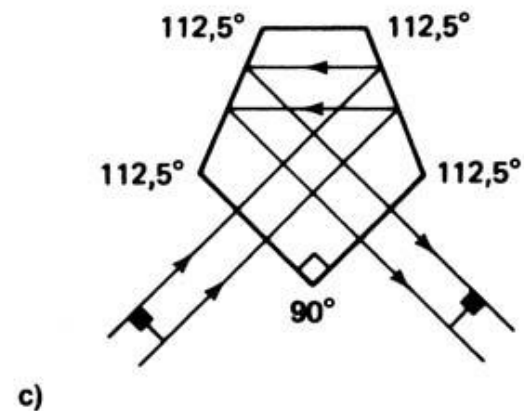
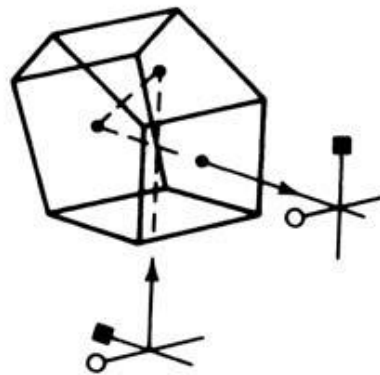


Änderung der Bildorientierung
durch Prismen:

a) 90° - Dachkantprisma
(Amiciprisma)

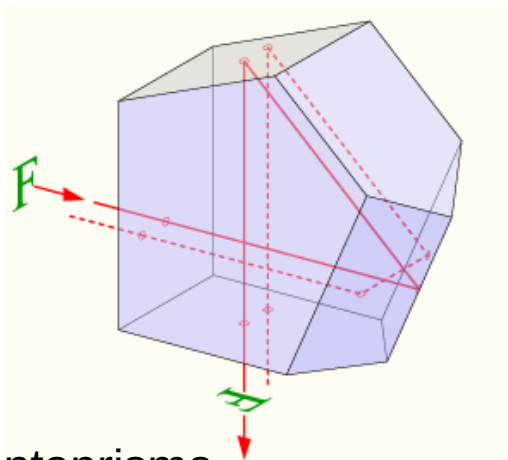
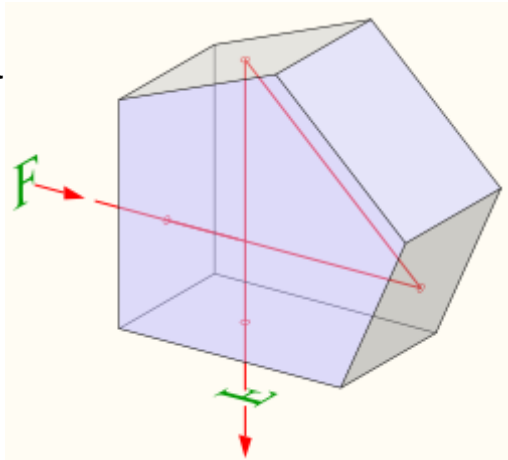
b) Dove-Prisma

c) Penta-Prisma



Anwendung: Änderung der Bildorientierung

Penta-Prisma

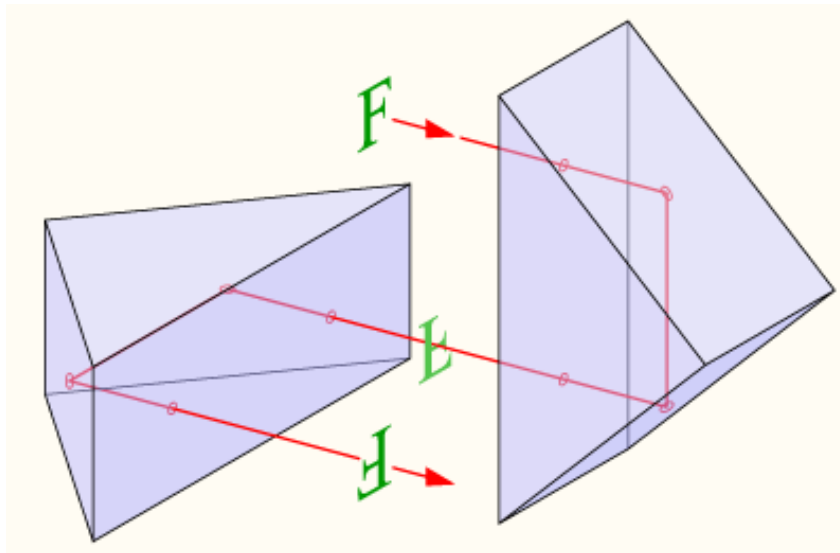


Dachkant-Pentaprisma

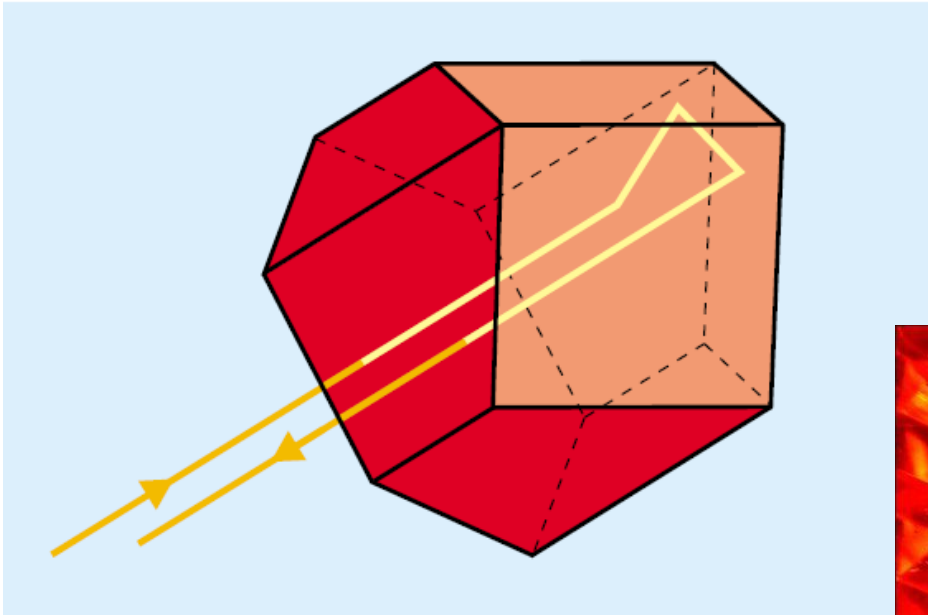


Anwendung: Änderung der Bildorientierung

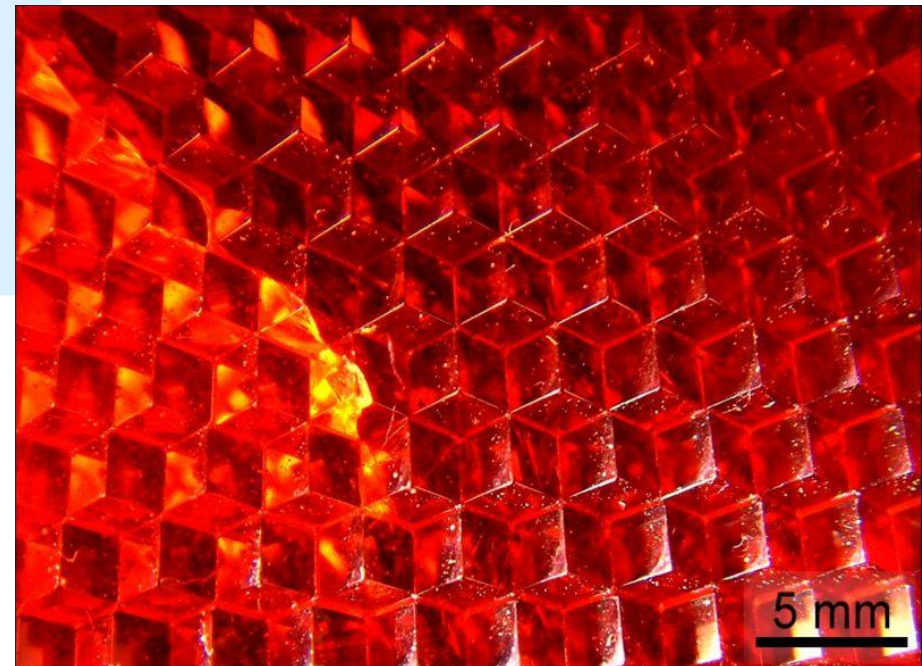
Porro-Prisma:



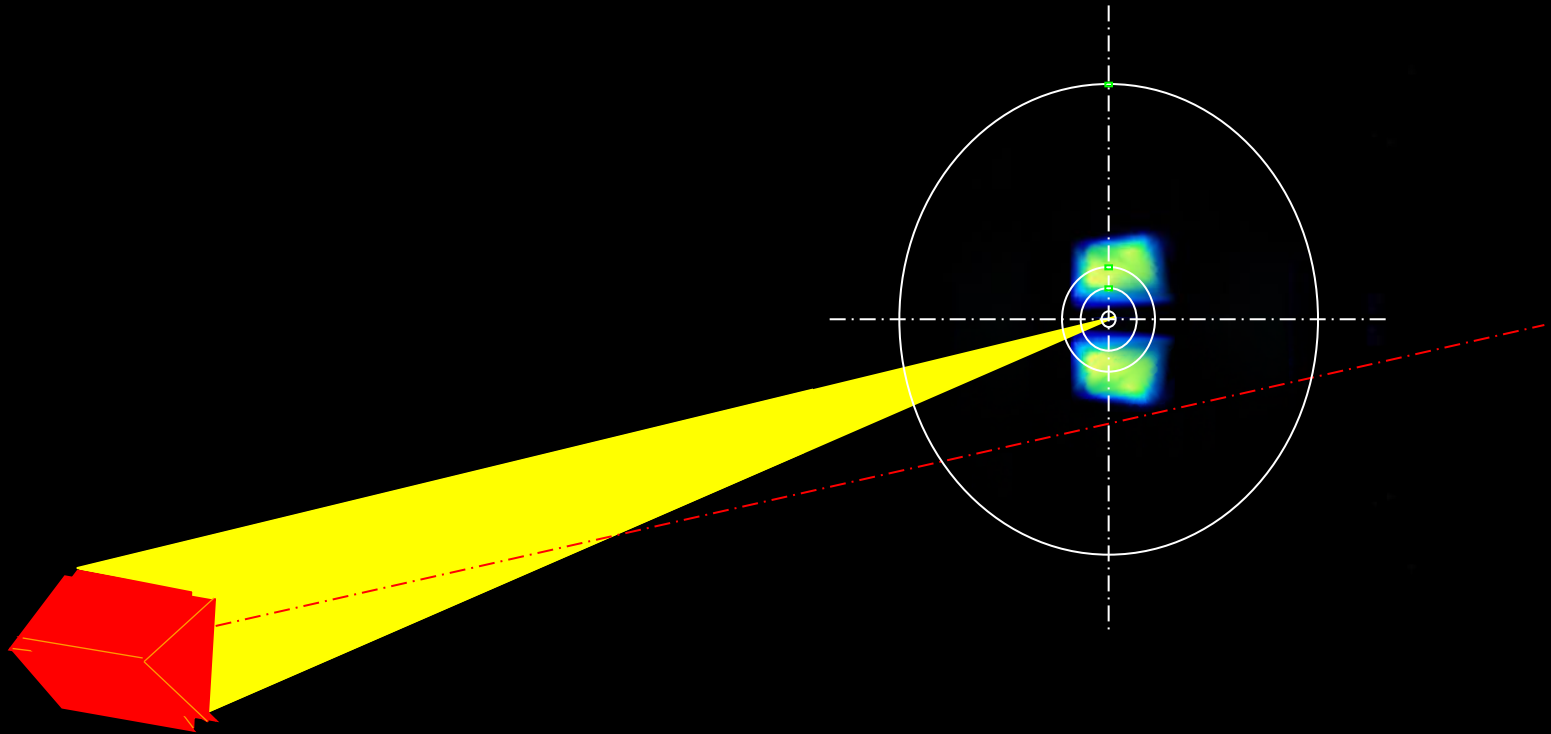
Anwendung: Rückstrahler



Strahlenverlauf im Rückstrahlertripel



Quelle: Hella



Wirkungsweise

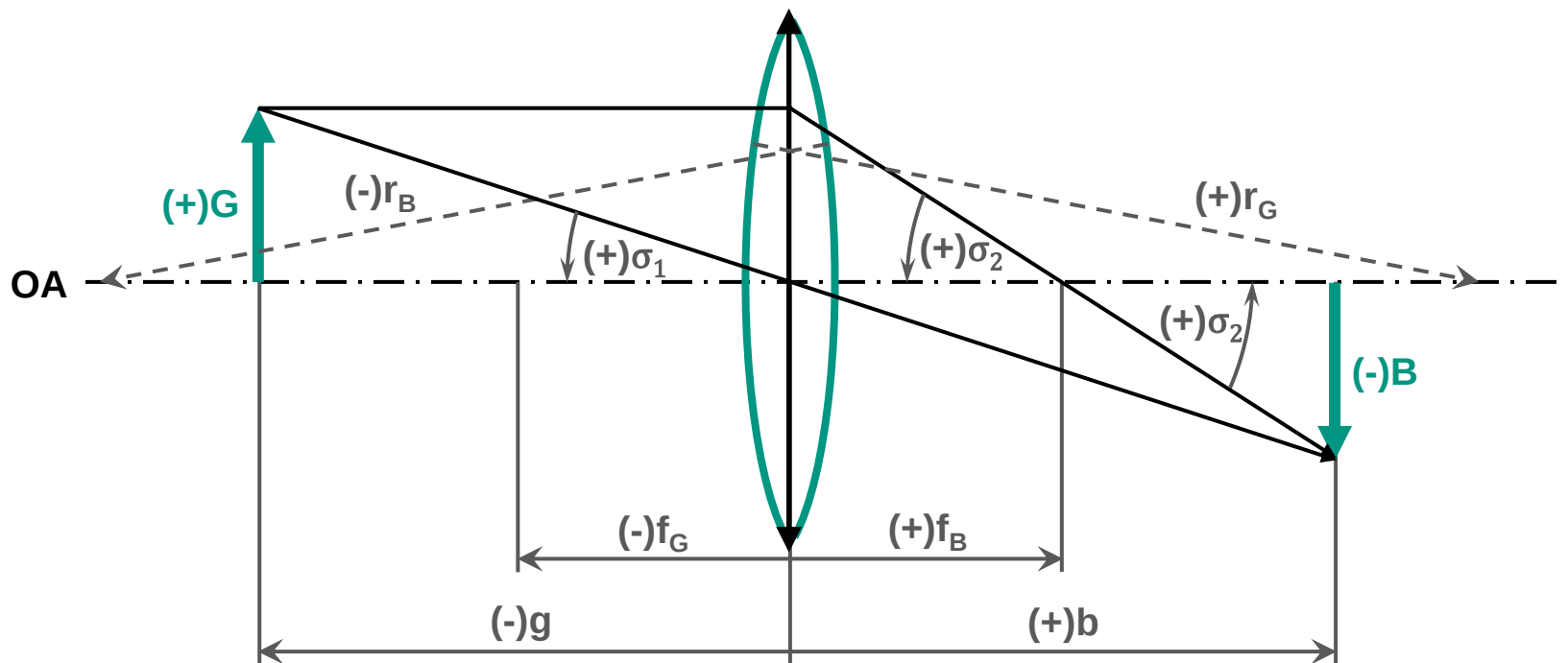
Linsen



www.lighthousegetaway.com

Vorzeichenkonvention: Linsen

- Bezugspunkt Strecken: Linse
 - Vorzeichen für Längen wie beim Spiegel ab der Linse (Folie 54)
- Bezugsschenkel für Winkel: Strahl zu optischen Achse (OA)

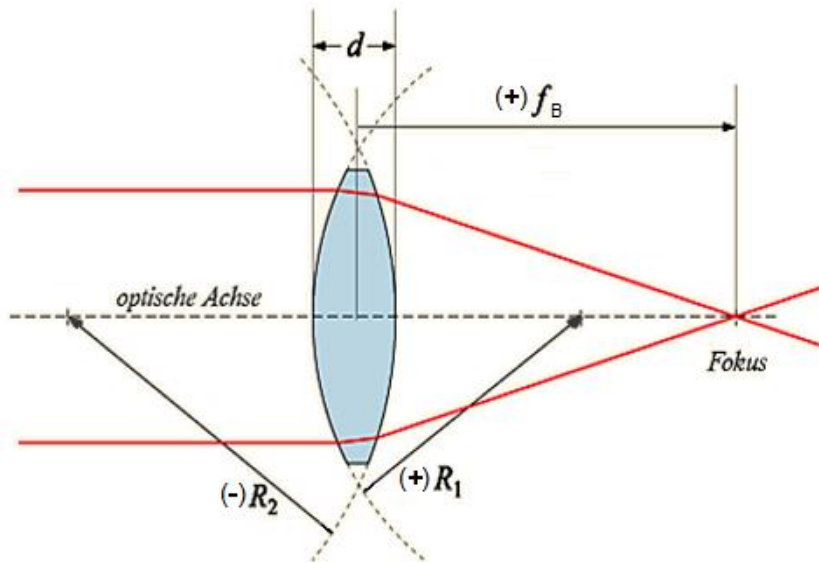


Linsen

Linsen nutzen die Brechkraft gekrümmter Flächen aus. Durch die Wahl der Flächen kann eine Linse **sammelnd** oder **zerstreuend** wirken.

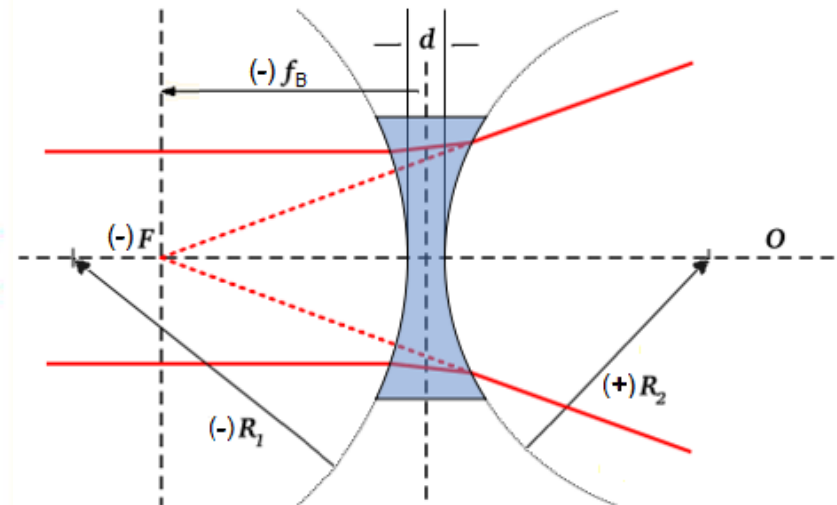
Jede gekrümmte Fläche hat eine Linsenwirkung!

Wird paralleles Licht durch die Linse in einem (auch virtuellen) Punkt konzentriert, so bezeichnet man diesen als **Fokus / Brennpunkt**.



Sammellinse / konvex

Quelle: <http://de.wikipedia.org>



Zerstreuungslinse / konkav

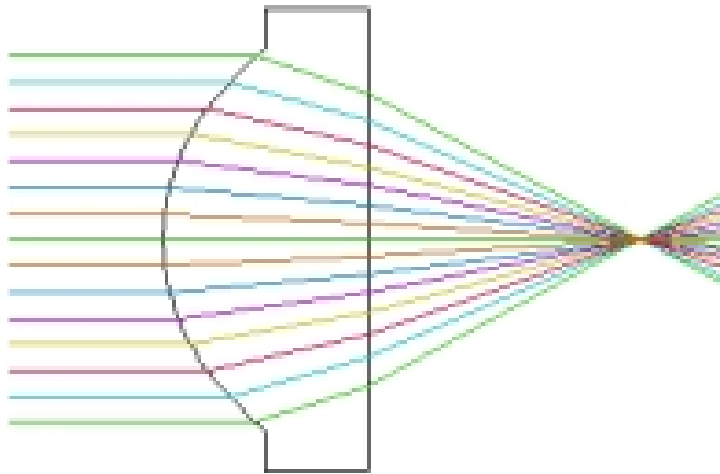
asphärische und sphärische Linsen

Eine Asphäre hat eine Kurvenform, welche das parallele Licht über die **gesamte** Einfallsoffnung in einem Fokus abbildet.

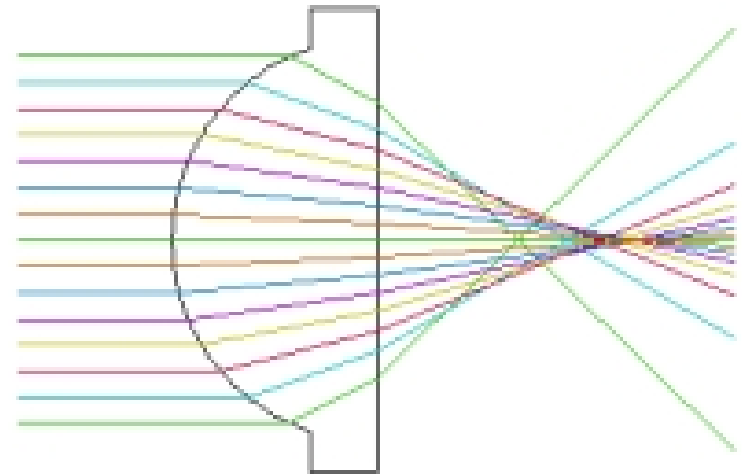
Eine Sphäre kann dies nur für achснаhe Strahlen! Randstrahlen werden a.G. der zu starken Krümmung stärker abgelenkt.

Achsnah gleichen sich die Abbildungen $\Rightarrow$ paraxiale Näherung!

Warum werden sphärische Linsen verwendet? $\Rightarrow$ Herstellung von Glaslinsen (kommt später).



asphärische Linse

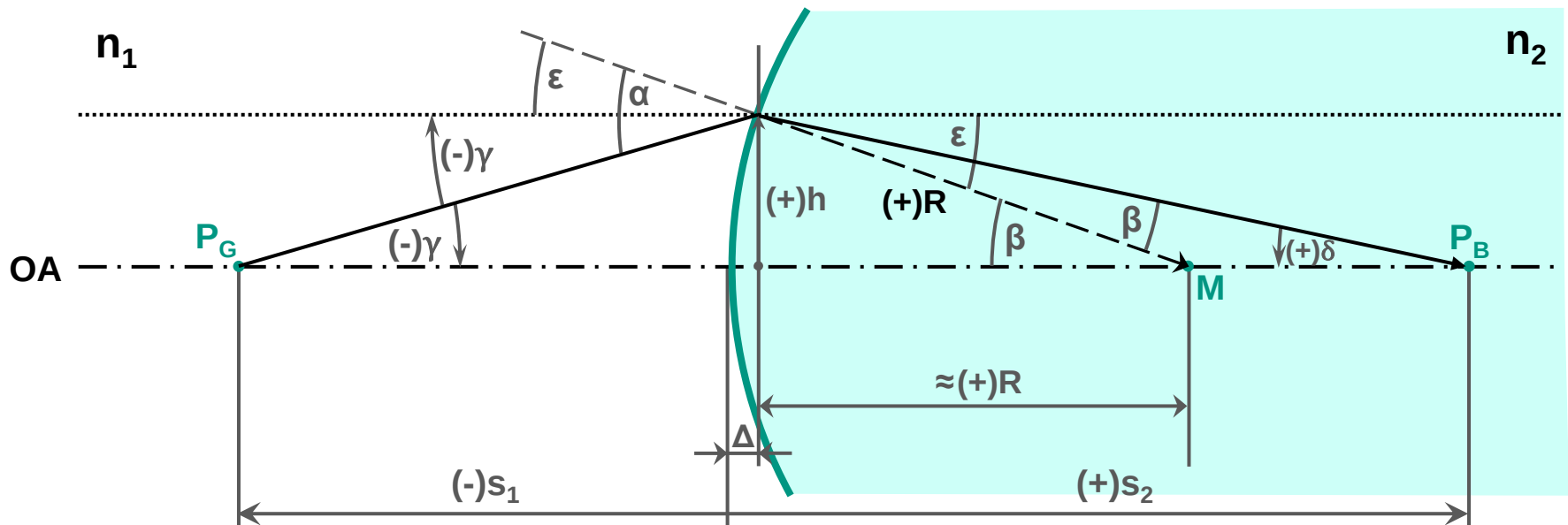


sphärische Linse

Quelle: www.analytik-jena.de

Vorzeichenkonvention: Abbesche Invariante

- Bezugspunkte: Scheitelpunkt auf der optischen Achse
 - Vorzeichen für Längen wie bei den Linsen (Folie 79)
 - Bezugsschenkel für Winkel: Strahl zu optischen Achse (OA)



Abbesche Invariante

Brechung an einer Kugelfläche mit Radius r :

$$\tan \gamma = \frac{h}{s_1 + \Delta} \quad \tan \delta = \frac{h}{s_2 - \Delta} \Rightarrow h = (s_1 + \Delta) \tan \gamma = (s_2 - \Delta) \tan \delta$$

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

$$\alpha = \varepsilon + \gamma \quad \beta = \varepsilon - \delta \quad \tan \varepsilon = \frac{h}{R - \Delta}$$

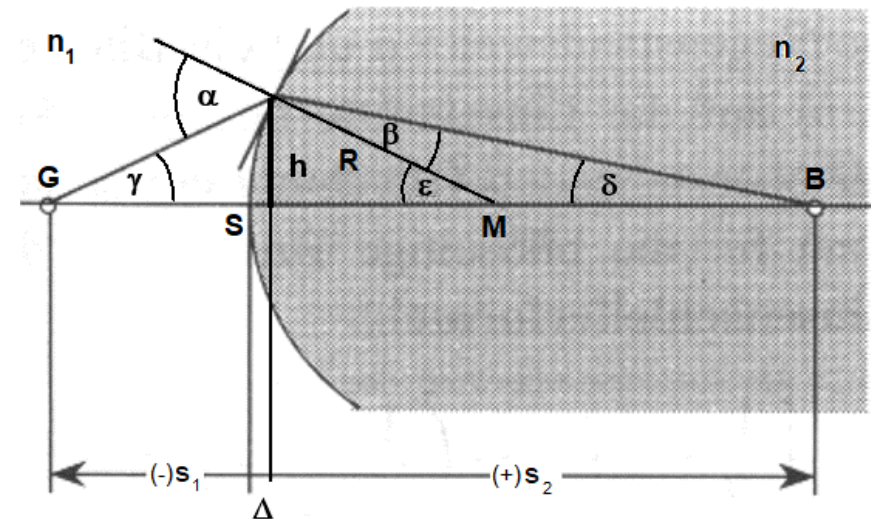
Paraxiale Näherung:

$$h \ll R \Rightarrow \tan \omega \approx \sin \omega \approx \omega, \quad \cos \omega \approx 1, \quad \Delta \approx 0$$

$$\gamma = \frac{h}{s_1} \quad \delta = \frac{h}{s_2}$$

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\frac{h}{R} + \gamma}{\frac{h}{R} - \delta} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 \left(\frac{h}{R} + \gamma \right) = n_2 \left(\frac{h}{R} - \delta \right)$$

$$\mapsto n_1 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{s_1} \right) = n_2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{s_2} \right)$$



Mit Vorzeichenkonvention:

$$n_i \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{s_i} \right) = \text{const.}$$

s_i bezeichnet die sog. **Schnittweite**

Abbildung von sphärischen Flächen

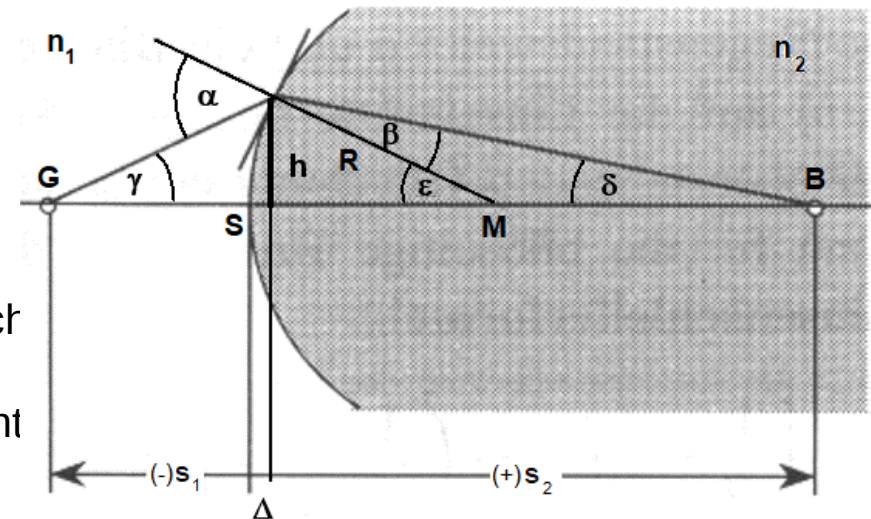
Anwendung auf Abbildung:

Mit VZ-Konvention:

$$\frac{n_2}{s_2} - \frac{n_1}{s_1} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

Die bildseitige Schnittweite ist unabhängig von der **Einfallshöhe / Strahlneigung** (gute Näherung bis ca. 10°). D.h. Alle von **einem Objektpunkt** ausgehende Strahlen treffen sich in **einem Bildpunkt**! $\Rightarrow$ Man benötigt nur zwei Strahlen zur Bildkonstruktion!

Setzt man jeweils eine Schnittweite als unendlich an, ergeben sich die Brennpunkte einer sphärischen Fläche aus der Abbeschen Invariant (beachte Vorzeichenkonvention „re = +“ „li = -“):



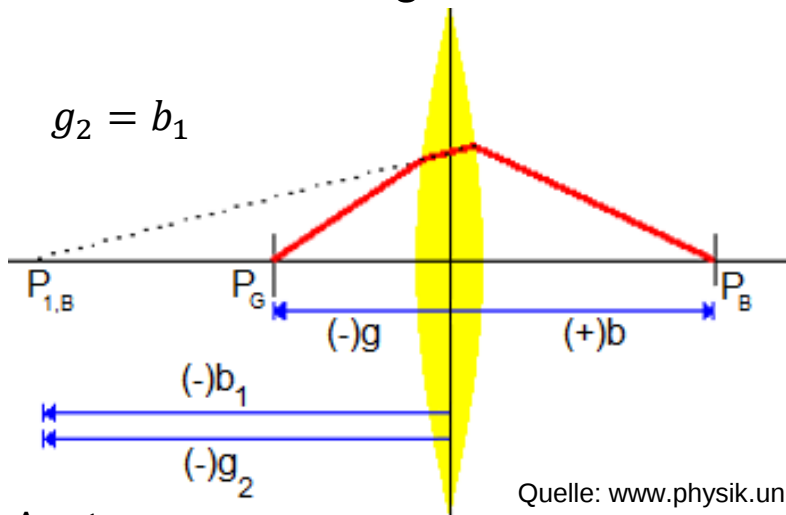
$$\frac{n_2}{\infty} - \frac{n_1}{f_G} = \frac{n_2 - n_1}{R} \Leftrightarrow f_G = -\frac{n_1}{n_2 - n_1} \cdot R$$

$$\frac{n_2}{f_B} - \frac{n_1}{\infty} = \frac{n_2 - n_1}{R} \Leftrightarrow f_B = \frac{n_2}{n_2 - n_1} \cdot R$$

$$\frac{f_B}{b} + \frac{f_G}{g} = 1$$

Berechnung von sphärischen Linsen

Die Berechnung der **paraxialen Abbildungseigenschaften** von rotationssymmetrischen Linsen geschieht mittels **iterativen Anwendung der Abbeschen Invariantengleichung**, der gebrochene (Bild-) Strahl wird als Gegenstandsstrahl der zweiten brechenden Fläche verwendet. Die zwei Brechungen an den beiden Flächen wird näherungsweise zu einer zusammengefasst!



Quelle: www.physik.uni-ulm.de

$\frac{\Delta n}{n_L} \frac{1}{R_i}$ bezeichnet man als **Brechkraft** [1/m = Dioptrie].

Brechkräfte addieren sich!

$$\frac{n_2}{b_1} - \frac{n_1}{g} = \frac{n_2 - n_1}{R_1}, \quad \frac{n_1}{b} - \frac{n_2}{b_1} = \frac{n_1 - n_2}{R_2}$$

$$\frac{1}{b} - \frac{1}{g} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Beachte **Vorzeichenkonvention**:

Kugelflächen rechts offen „+“, links offen „-“

Abstände nach rechts „+“, links „-“

Dünne sphärische Linsen

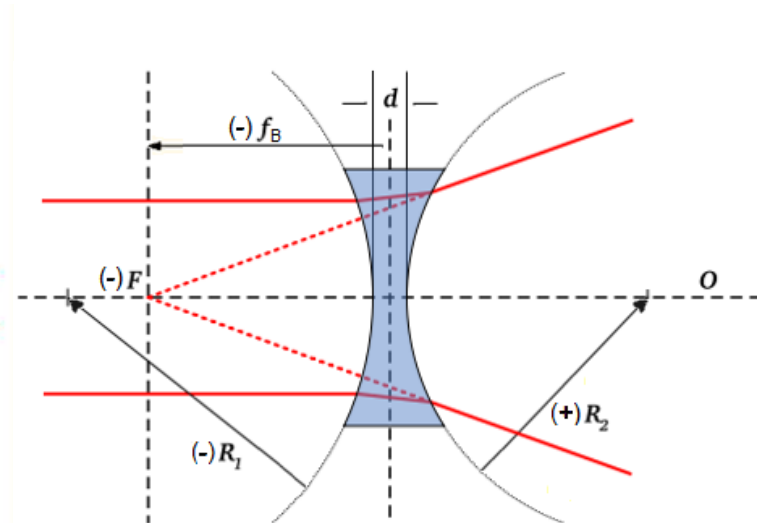
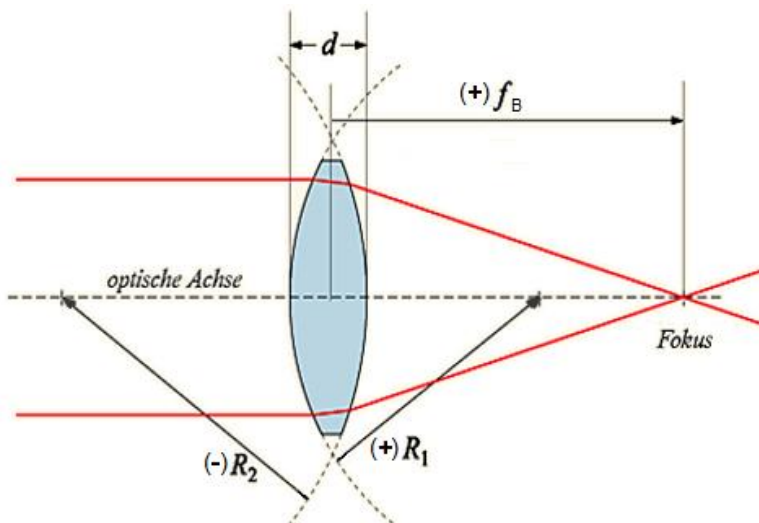
Setzt man g oder b als unendlich, so ergibt die **Brennweite** der Linse als Kehrwert der **Brechkraft**. Eine Linse hat nur eine Brennweite!

$$\frac{1}{f_B} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

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

Ist $f_B > 0$: Sammellinse

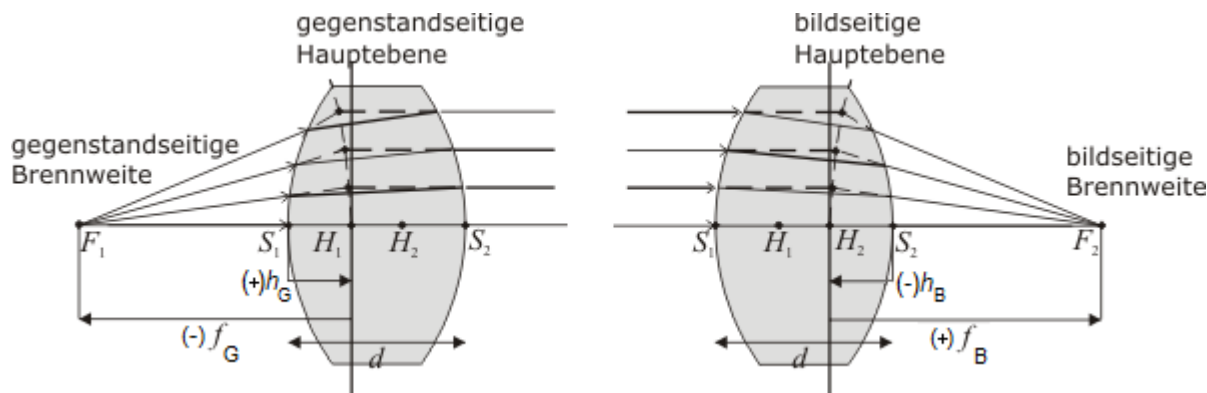
Ist $f_B < 0$: Zerstreuungslinse



Dicke sphärische Linsen

- Bei dicken Linsen ist der Lichtweg innerhalb der Linse mit zu berücksichtigen. f , g und b können nicht mehr von der Linsenmitte gemessen werden $\Rightarrow$ Einführung von zwei Hauptebenen.
- f , g und b werden nun von der entsprechenden Hauptebene aus gemessen. Für die Brennweite und die Abstände h_1 und h_2 leitet man geometrisch ab:

$$\frac{1}{f_B} = \frac{n_L - n}{n} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{(n_L - n)^2 \cdot d}{n_L \cdot n \cdot R_1 \cdot R_2}, \quad h_G = \frac{f_G \cdot (n_L - n) \cdot d}{n_L \cdot R_2}, \quad h_B = - \frac{f_B \cdot (n_L - n) \cdot d}{n_L \cdot R_1}$$



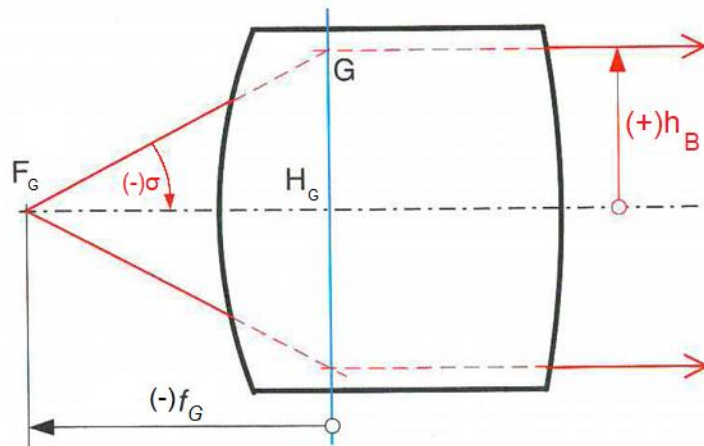
Quelle: www.chemgapedia.de

Merkregel: Für eine optische Dichte von ca. 1,5 ist der Abstand der Hauptebenen etwa 1/3 der Linsendicke.

Dicke sphärische Linsen

- Objektseitige Hauptebene: virtuelle Schnittebene des divergierenden/konvergierenden Bündels mit austretendem Parallelbündel
- Objektseitiger Hauptpunkt: Schnittpunkt der objektseitigen Hauptebene mit der optischen Achse

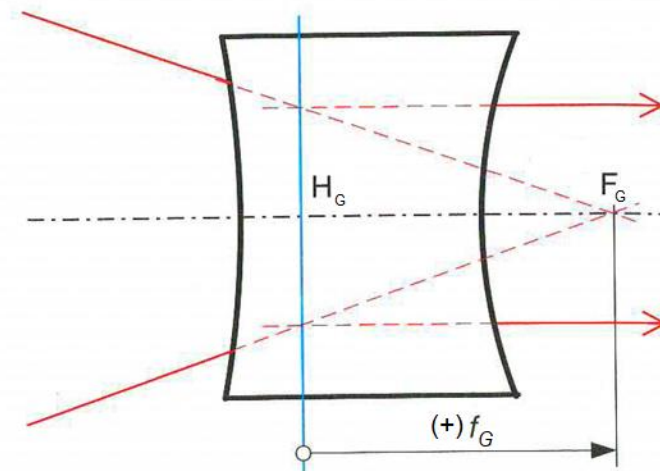
a) Positivsystem, sammelndes System



mit:

F_G objektseitiger Brennpunkt, Objektbrennpunkt
 H_G objektseitige Hauptebene, Objekthauptebene
 $f_G = H_G F_G$ objektseitige Brennweite, Objektbrennweite
 σ objektseitiger Öffnungswinkel

b) Negativsystem, zerstreues System

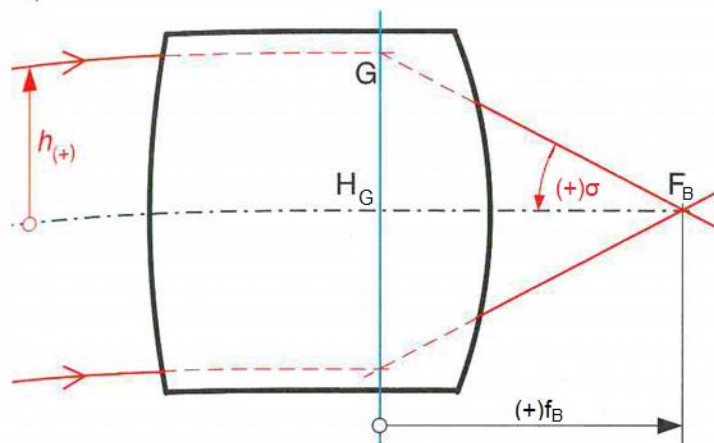


Quelle: Schröder/Treiber, *Technische Optik*

Dicke sphärische Linsen

- Bildseite Hauptebene: Virtuelle Schnittebene des achsparallel einfallenden Bündels mit konvergierendem/divergierendem ausfallenden Bündel
- Bildseitiger Hauptpunkt: Schnittpunkt der bildseitigen Hauptebene mit der optischen Achse

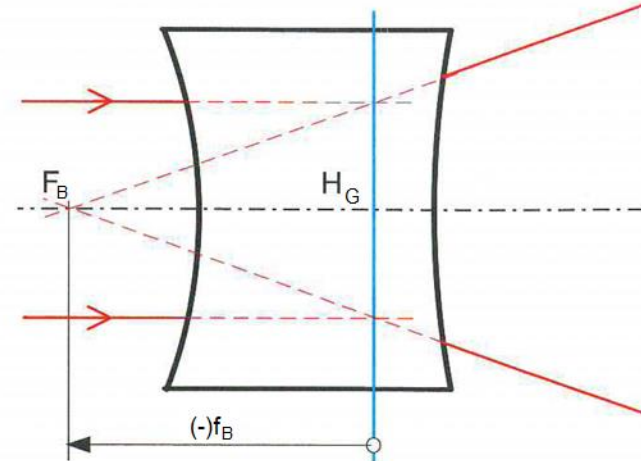
a) Positivsystem, sammelndes System



mit:

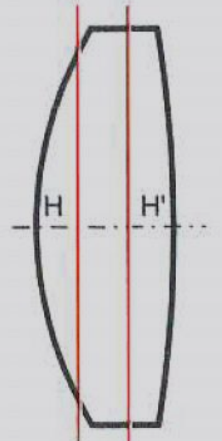
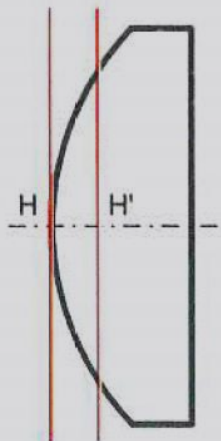
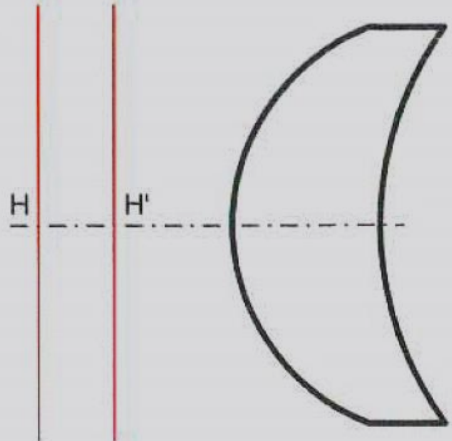
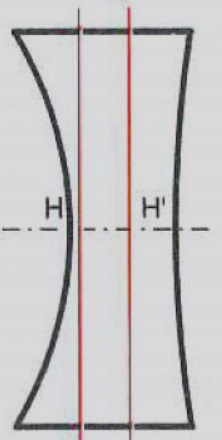
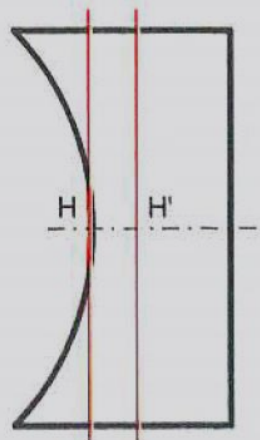
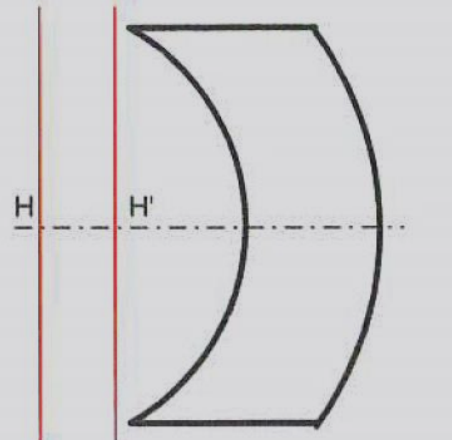
F_B bildseitiger Brennpunkt, Bildbrennpunkt
 H_B bildseitige Hauptebene, Bildhauptebene
 $f_B = H_B F_B$ bildseitige Brennweite, Bildbrennweite
 σ bildseitiger Öffnungswinkel

b) Negativsystem, zerstreues System



Quelle: Schröder/Treiber, *Technische Optik*

Dicke sphärische Linsen

Bi-Linsen		Planlinsen	Menisken
symmetrisch	unsymmetrisch		
			
			

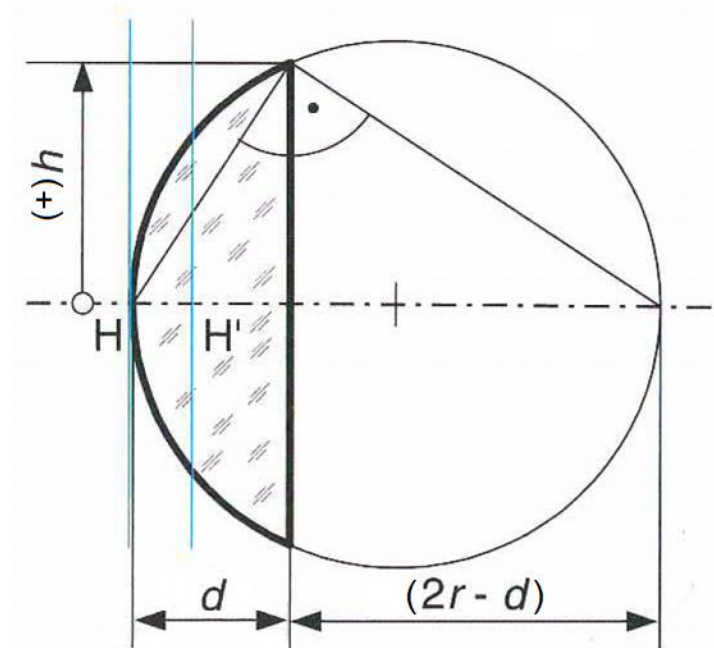
Anwendung: Plankonvexe Linse

Für Planfläche gilt $r_2 \rightarrow \infty$

Damit ergibt sich

$$f = \frac{r_1}{n_L - 1}$$

Parax. Brennweite unabhängig von d!



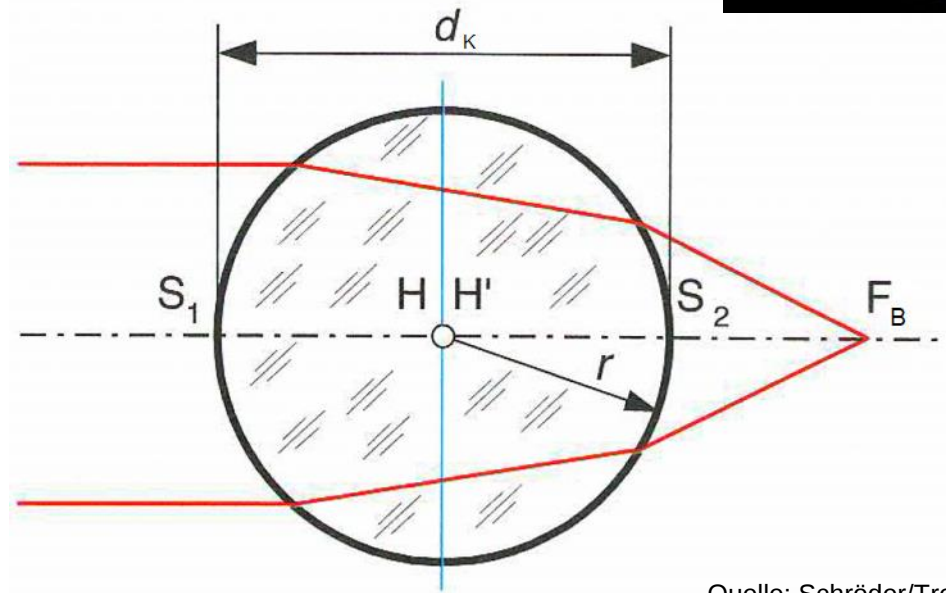
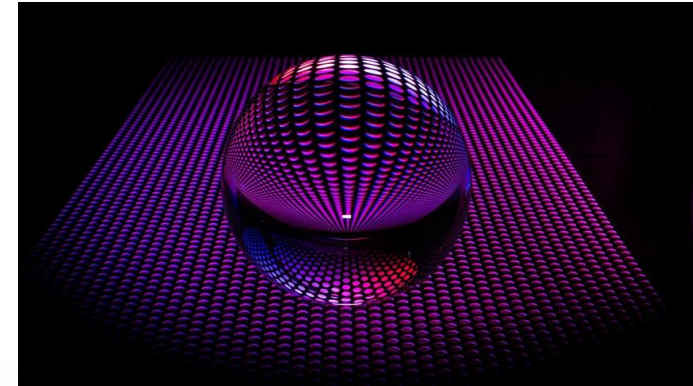
Quelle: Schröder/Treiber, *Technische Optik*

Anwendung: Kugellinse

Für Kugellinse gilt $r_1 = r = -r_2$ $d_K = 2r$

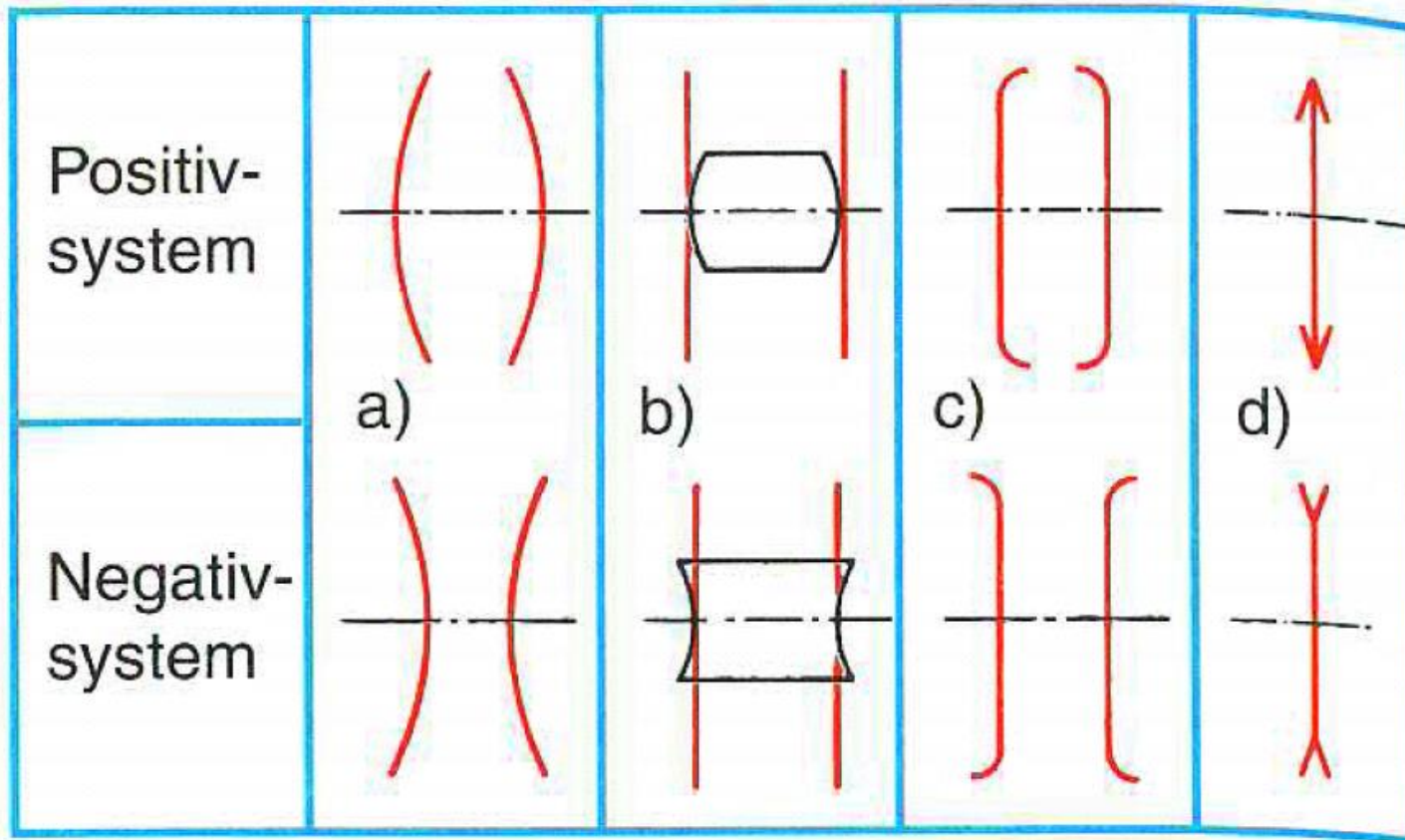
Damit ergibt sich

$$f = \frac{n_L}{n_L - 1} \frac{r}{2}$$



Quelle: Schröder/Treiber, *Technische Optik*, pixolum.com

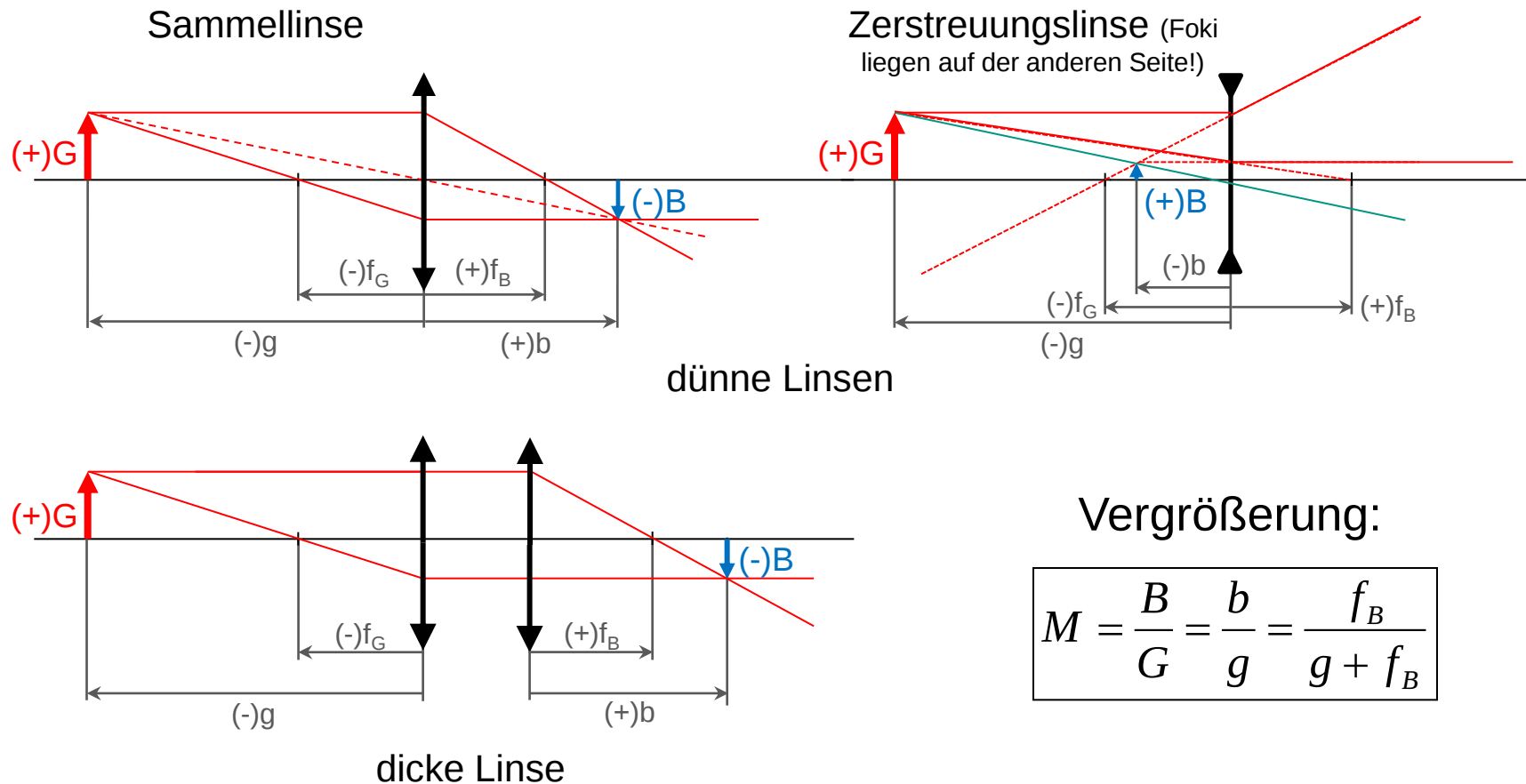
Darstellung von Linsen



Quelle: Schröder/Treiber, *Technische Optik*

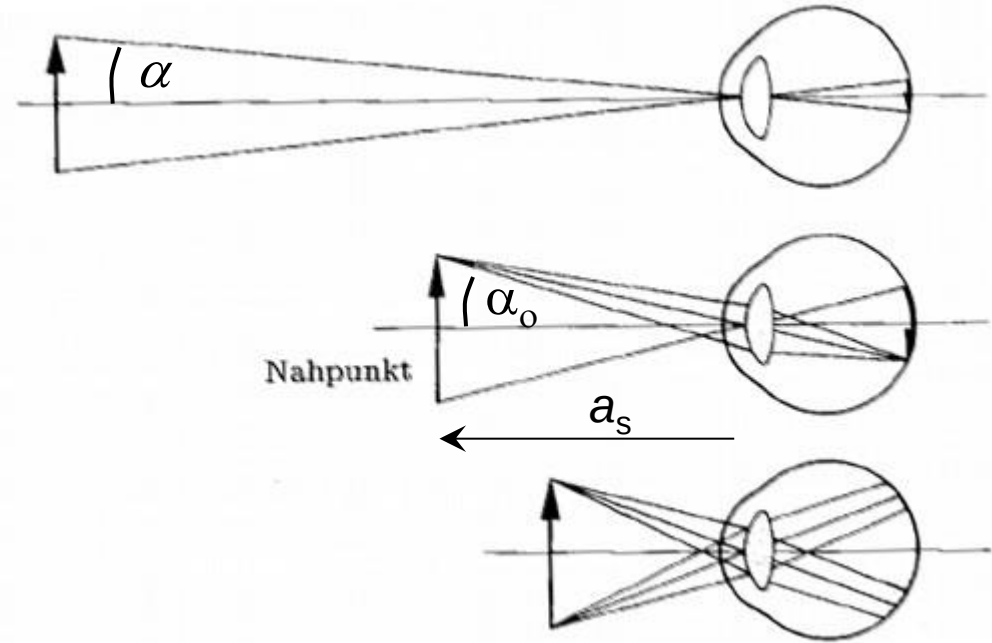
Bildkonstruktion

Da alle von einem Punkt ausgehenden Gegenstandsstrahlen wieder in einem Bildpunkt zusammentreffen kann man zwei beliebige Strahlen wählen $\Rightarrow$ Beste Wahl: Brennpunkt-, Mittelpunkts- oder Parallelstrahl!



Anwendung: Lupe

- Ein Objekt erscheint groß, wenn wir es unter einem großen, und klein, wenn wir es unter einem kleinen Sehwinkel α sehen

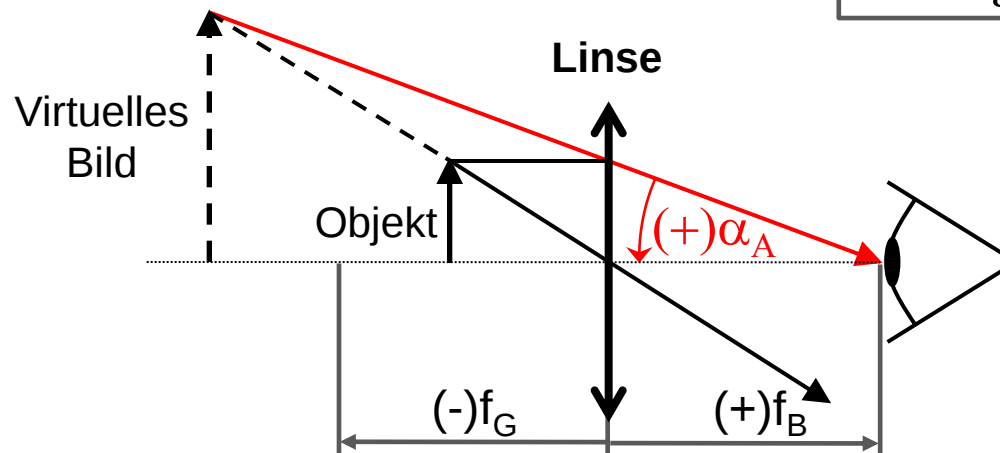


- Eine Vergrößerung kann durch näher holen erreicht werden, allerdings nur bis zu einer gewissen Grenze
 ⇒ **Nahpunkt** im Durchschnitt 25 cm
- Zur weiteren Vergrößerung wird ein optisches Gerät benötigt, das den Sehwinkel vergrößert, z.B. eine Lupe

Anwendung: Lupe

- Objekt liegt innerhalb der einfachen Brennweite
- Erzeugung eines virtuellen, vergrößerten Bildes, das mit dem Auge betrachtet wird

$$M = \frac{f_B}{g + f_B} = \frac{\alpha_A}{\alpha_O}$$



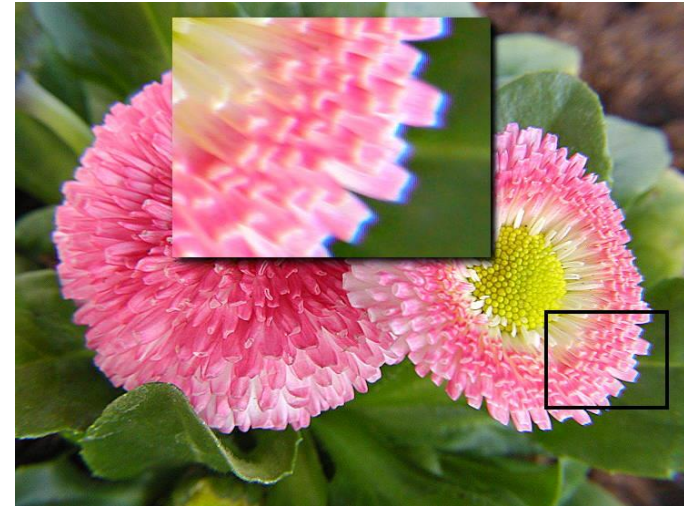
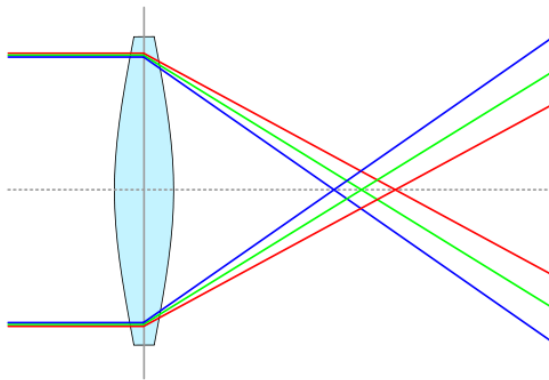
- Bezugssehweite für a_S : 25 cm

Linsen sind wegen ihrer Materialeigenschaften und ihrer Form niemals ideal, sondern erzeugen eine Anzahl von Abbildungsfehlern. Man unterscheidet:

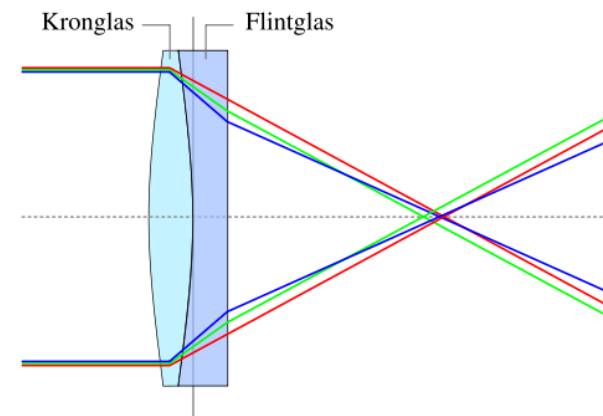
- Geometrische Aberration: Linsenfehler, die a. G. der Linsenform entstehen (besonders bei sphärischen Linsen).
- Chromatische Aberration: Linsenfehler, welche a. G. der Materialeigenschaften (Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex) entstehen.

Linsenfehler: Chromatische Aberration

- Wegen der Dispersion werden Lichtstrahlen verschiedener Wellenlänge in verschiedenen Punkten fokussiert:



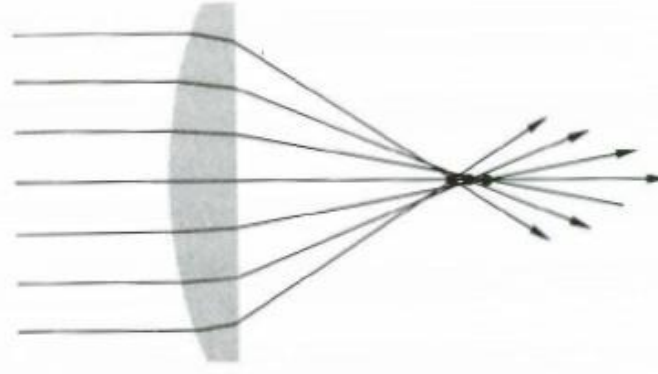
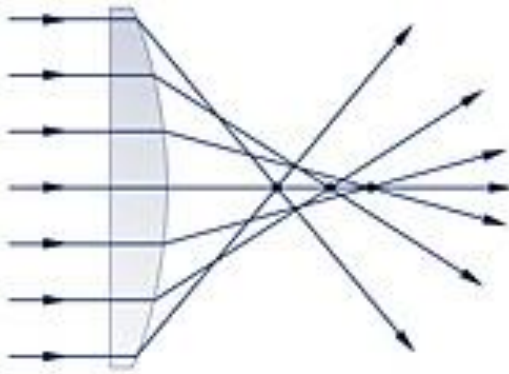
- **Korrektur** durch so genannte **Achromaten**:



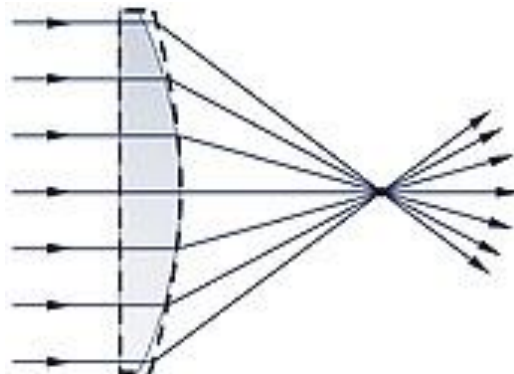
Quellen: <http://de.wikipedia.org/>
<http://cfi.linnet.de/fototips/farbsaum.html>

Linsenfehler: sphärische Aberration

- Wegen kugelförmiger Oberfläche gängiger Linsen werden Strahlen am Rand der Linse nicht im Fokus fokussiert



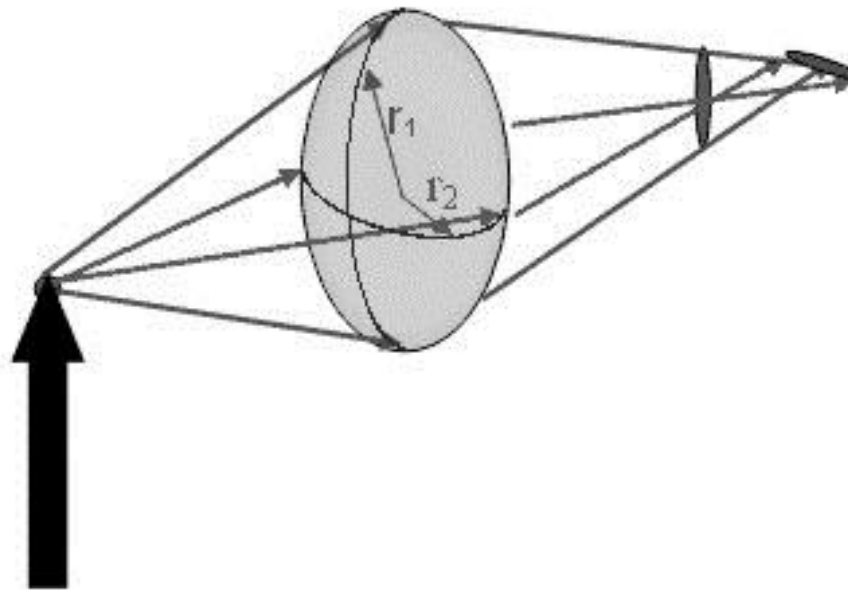
- Korrektur durch **asphärische** Linsenform



Quelle: <http://www.iol-test.org/>

Linsenfehler: Astigmatismus

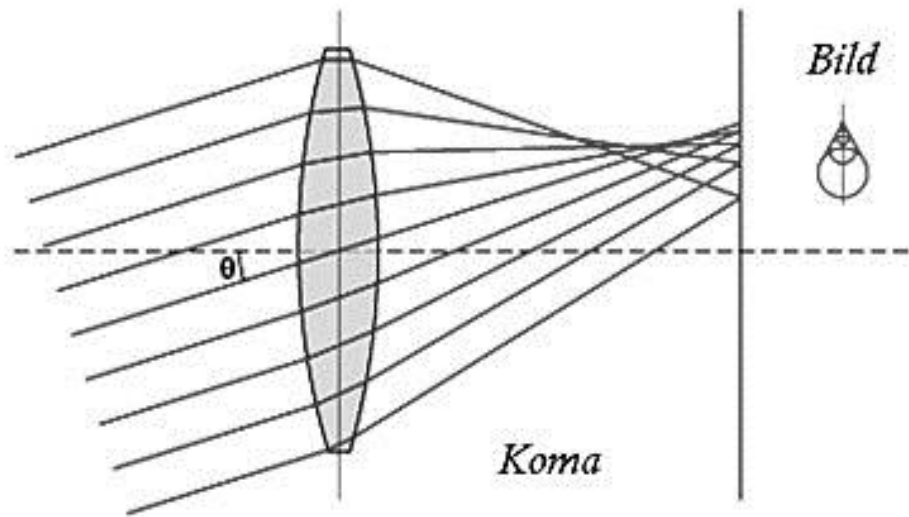
- Linsen mit verschiedenen Krümmungsradien in verschiedene Ebenen fokussieren das Licht in verschiedenen Punkte (Extremfall Zylinderlinse)



Quelle: <http://www.puchner.org/>

Linsenfehler: Koma

- Lichtstrahlen, die von abseits der optischen Achse kommen, werden auch abseits dieser Achse gebündelt
- verschärfte Form der sphärischen Aberration



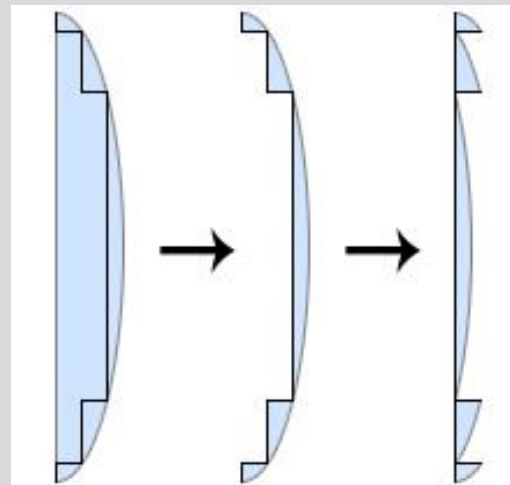
Quelle: <http://de.wikipedia.org/>

Anwendung: Fresnellinsen

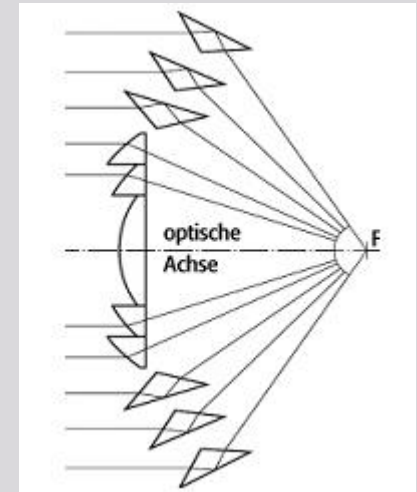


Um starke Materialanhäufungen zu vermeiden (Stabilität, Materialverbrauch, Kosten etc.) verwendet man „Skelettierte Linsen“. Diese **Fresnellinsen** haben eine geringere Abbildungsqualität.

Vorteil: sehr große Öffnungswinkel durch Brechungs- und Totalreflexionsprismen.

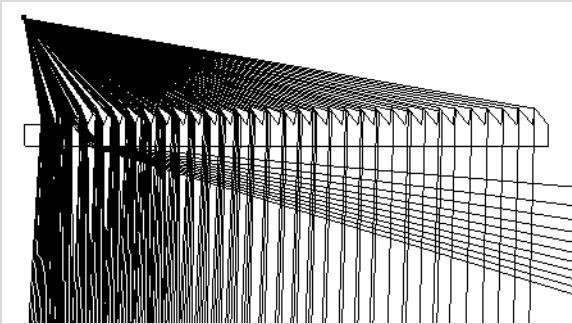


Quelle: www.phynet.de

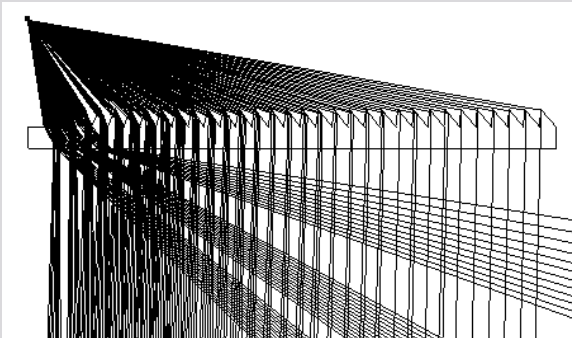


Quelle: www.sience-days.de

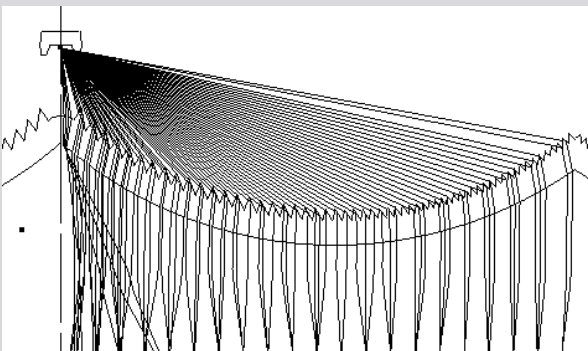
Anwendung: Fresnellinsen



Brechungs- & TR Prismen



TR Prismen



TR Prismen „Taifun Linse“

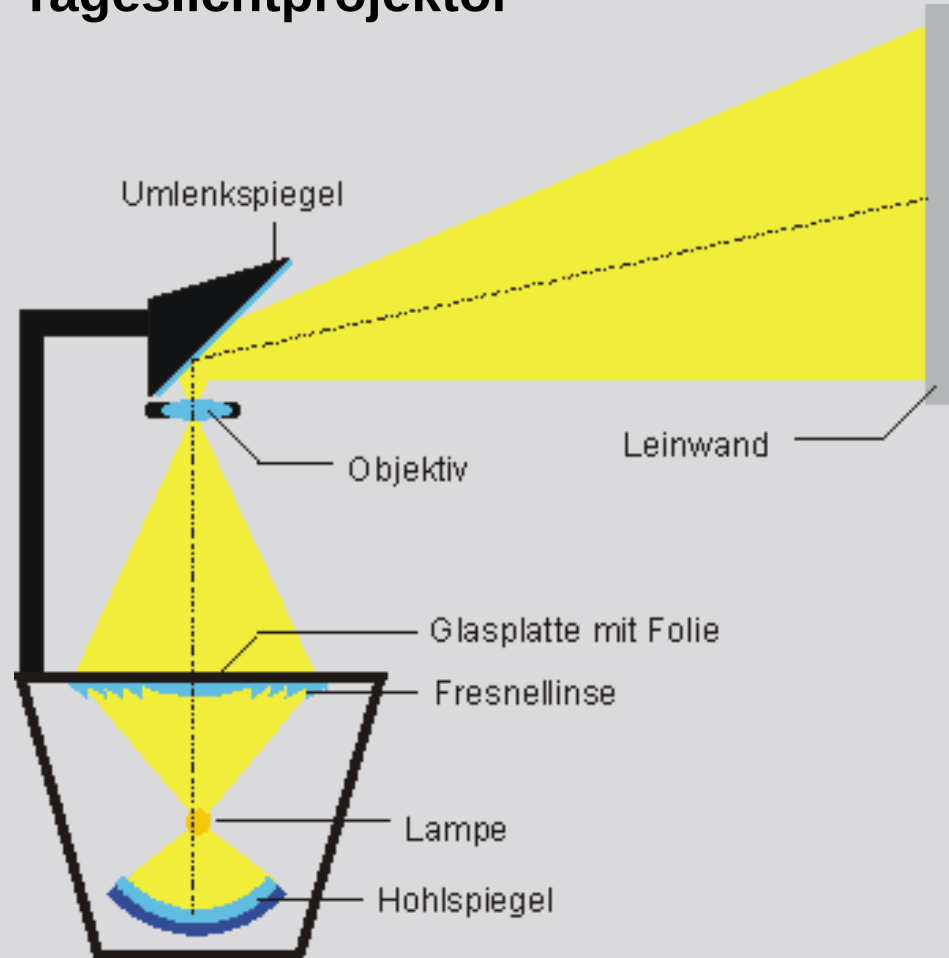
Quelle: Hella



Anwendung: Fresnellinsen



Tageslichtprojektor



Quelle: <http://leifi.physik.uni-muenchen.de>

Hochgesetzte Bremsleuchten



Quelle: Hella

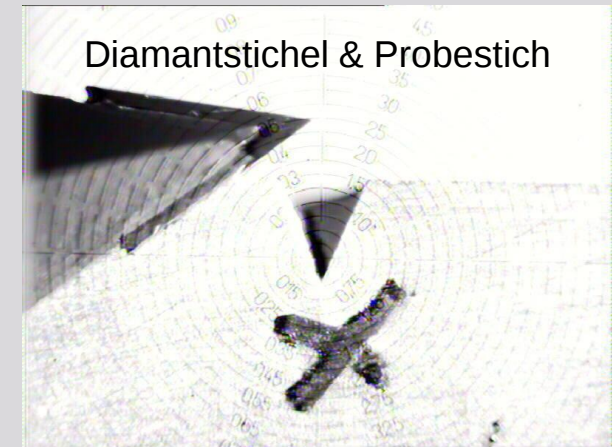
Anwendung: Fresnellinsen

Fresnellinsen sind ideale Linsenform für günstige Kunststofflinsen.

Herstellung von Kunststofflinsen im Spritzgussverfahren.

Werkzeugeinsatz wird in speziellen Verfahren mittels Diamantstichel gedreht.

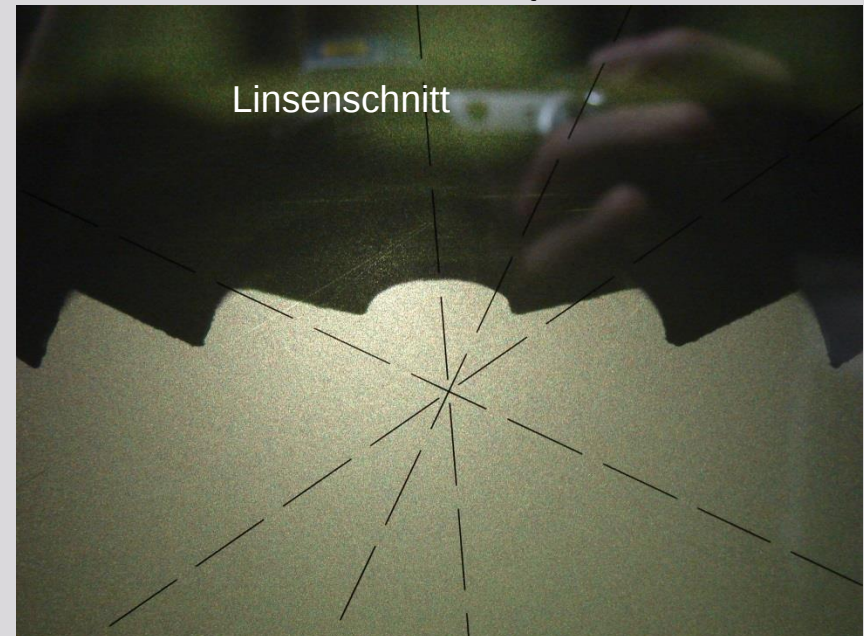
Kritisch: Verrundungsradien & Oberflächenqualität.



Quelle: Hella



Werkzeugeinsatz



Linsenschnitt

Anwendung: Fresnellinsen



Spritzgussmaschine

Quelle: Engel



Inhalt

- Grundlagen
- Reflexion & Brechung
- Absorption
- Spiegel
- Prismen & Linsen
- Polarisation
- Beugung & Interferenz

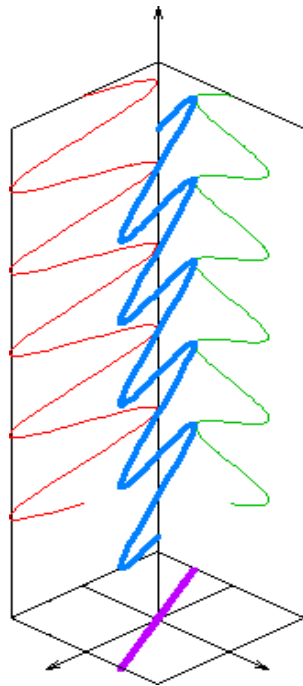
Polarisation



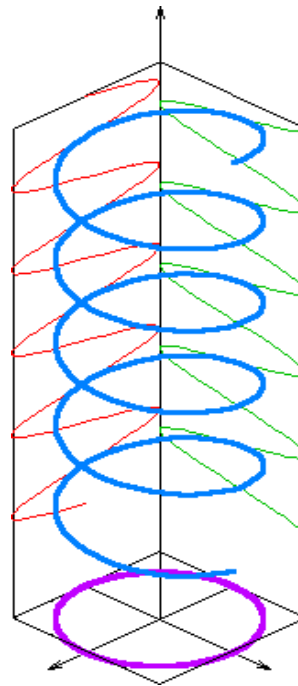
Grundlagen: Polarisation

Die Polarisation beschreibt die Ausrichtung des **E** Vektors

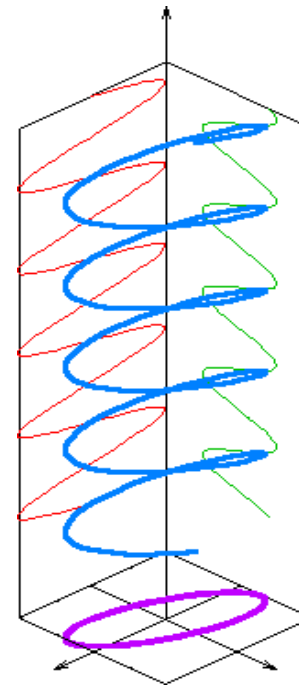
- **Lineare Polarisation:** orthogonale Superposition zweier **E** mit 0° Phase
- **Zirkulare Polarisation:** orthogonale Superposition gleicher **E** mit 90° Phase
- **Elliptische Polarisation:** orthogonale Superposition ungleicher **E** mit Phase ungleich 90°



Linear



Zirkular



Elliptisch

Quelle: www.wikipedia.org

Lineare Polarisation

Die Polarisation einer elektromagnetischen Welle ist die Richtung ihres elektrischen Feldvektors.

Lineare Polarisation: Die Richtung des E-Feld-Vektors ist konstant.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \exp[j(\omega t - kz)]$$

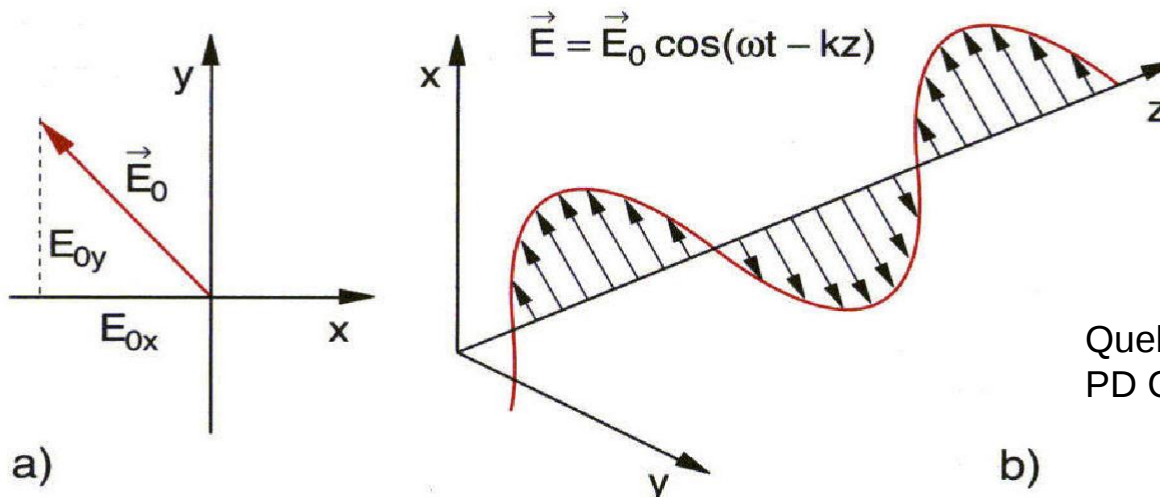
mit

$$\mathbf{E}_0 = E_{0x} \mathbf{e}_x + E_{0y} \mathbf{e}_y$$

$$E_x(z, t) = E_{0x} \exp[j(\omega t - kz)]$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \exp[j(\omega t - kz)]$$

schwingen in Phase

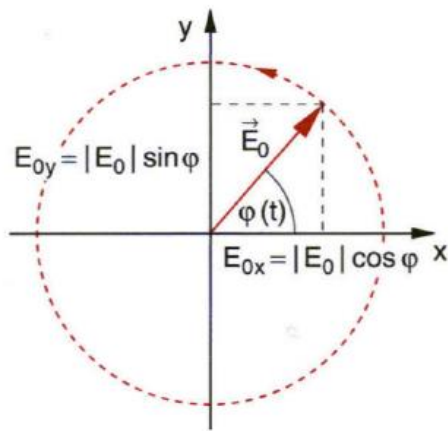


Quelle für zahlreiche Bilder:
PD G. Pietsch, Uni Halle

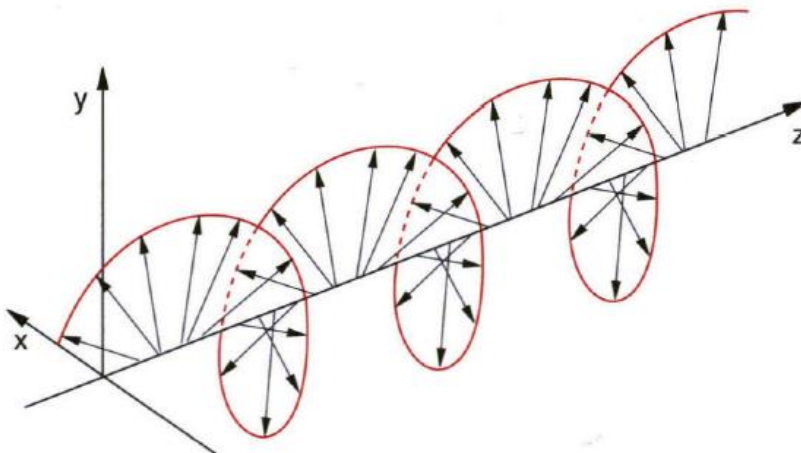
Zirkulare und elliptische Polarisation

Die Polarisation einer elektromagnetischen Welle ist die Richtung ihres elektrischen Feldvektors.

Zirkulare Polarisation: Der E-Feld-Vektor rotiert mit Kreisfrequenz ω .



a)



Elliptische Polarisation

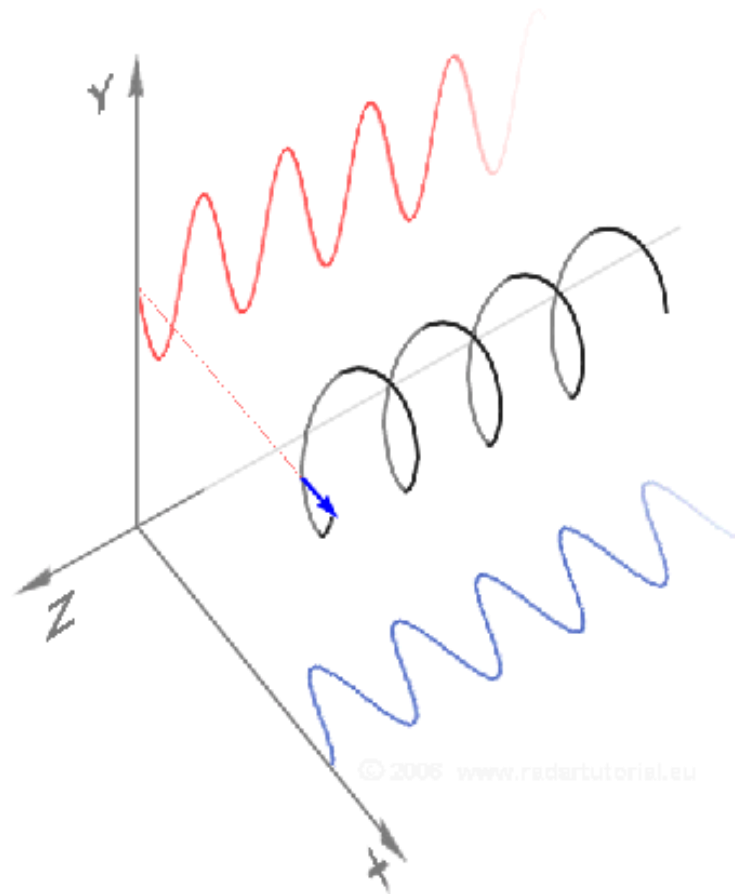
$$E_{0x} \neq E_{0y} \text{ oder}$$

$$\text{Phasenunterschied} \neq 90^\circ$$

Im Allgemeinen (z.B. Sonne, Glühlampe) ist Licht *unpolarisiert*, da es aus sehr vielen überlagerten elektromagnetischen Wellen mit statistischer Polarisation besteht. Ausnahmen: z.B. Laser, gefiltertes Licht

Grundlagen: Polarisation

zirkulare Polarisation animiert



Quelle: www.wikipedia.org

Grundlagen: Polarisation

Licht aus thermischen Lichtquellen z.B. Sonne oder Glühlampen ist unpolarisiert

- Inkohärente Überlagerung vieler Einzelwellen mit statistisch verteilten Polarisationszuständen

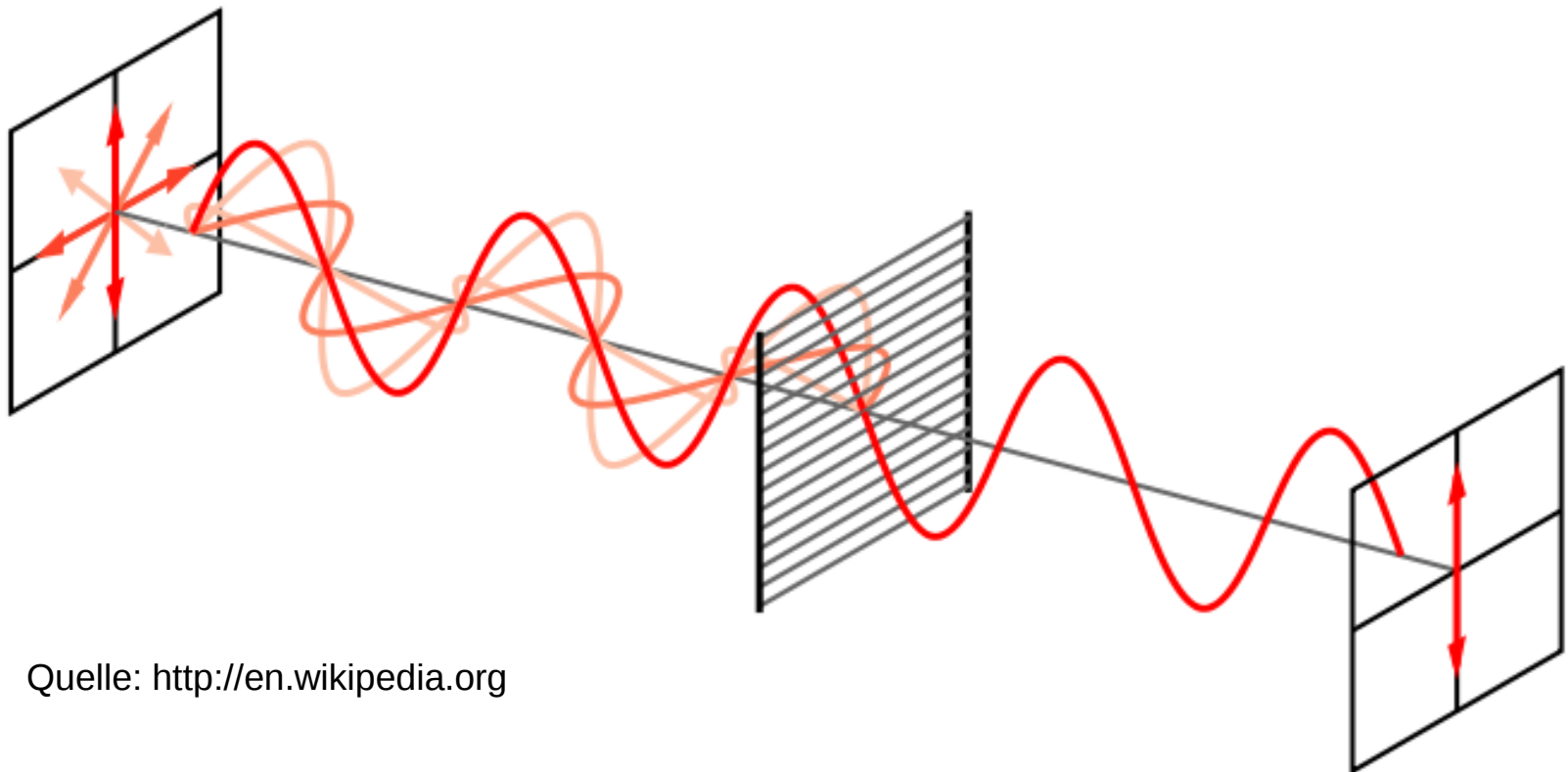
Licht aus Lasern meistens polarisiert (Polarisationsrichtung kann instabil sein)

Unpolarisiertes Licht kann polarisiert werden durch

- Absorption
- Reflexion
- Streuung
- Doppelbrechung

Polarisation durch Absorption: Gitterpolarisator

- EM-Welle induziert Bewegung von Elektronen entlang Draht mit Absorptionsverlusten.
- Effizienter Polarisator, wenn Draht wesentlich dünner als Wellenlänge und Abstand der Drähte kleiner als Wellenlänge
- Geeignet für Mikrowellen bis mittleren Infrarotbereich



Quelle: <http://en.wikipedia.org>

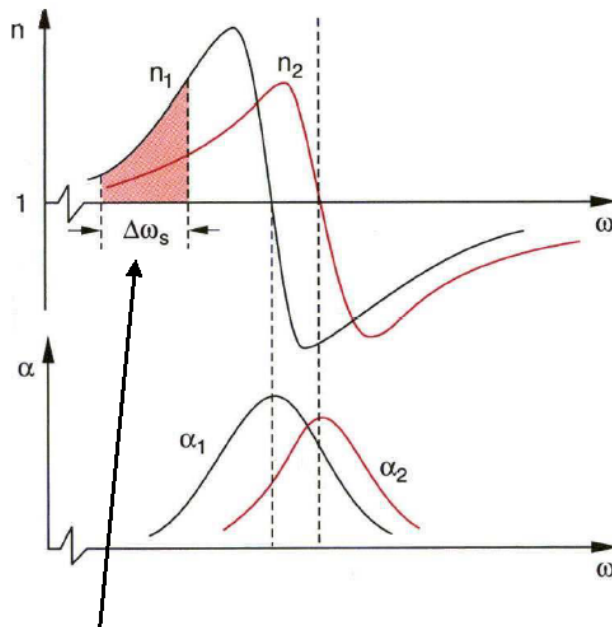
Polarisation durch Absorption: PVA-Folie

- PVA-Folie (Polyvinylalkohol), bei der während der Herstellung durch Zug die Polymerketten ausgerichtet werden. Absorption durch Jod-Dotierung.
 - Elektronen bewegen sich entlang ausgerichteter Ketten und Licht wird absorbiert ähnlich wie im Gitterpolarisator.
 - Licht senkrecht zu Polymerketten wird transmittiert.
 - Z.B. Polaroid ® Folie

- Eingesetzt z.B. in Sonnenbrillen, Fotografie-Filtern und Flüssigkristallbildschirmen
 - Wesentlich billiger als andere Polarisatorkonzepte
 - Wirkungsgrad nicht so hoch

Polarisation durch Absorption: Dichroismus

In einem optisch anisotropen Medium hängt der Brechungsindex von der Ausbreitungsrichtung und der Polarisationsrichtung der elektromagnetischen Welle ab. Ursache ist im Normalfall die „fehlende“ Symmetrie der Kristallstruktur.



Sichtbares Licht

Realteil von n (Dispersion)

$\Rightarrow$ Doppelbrechung

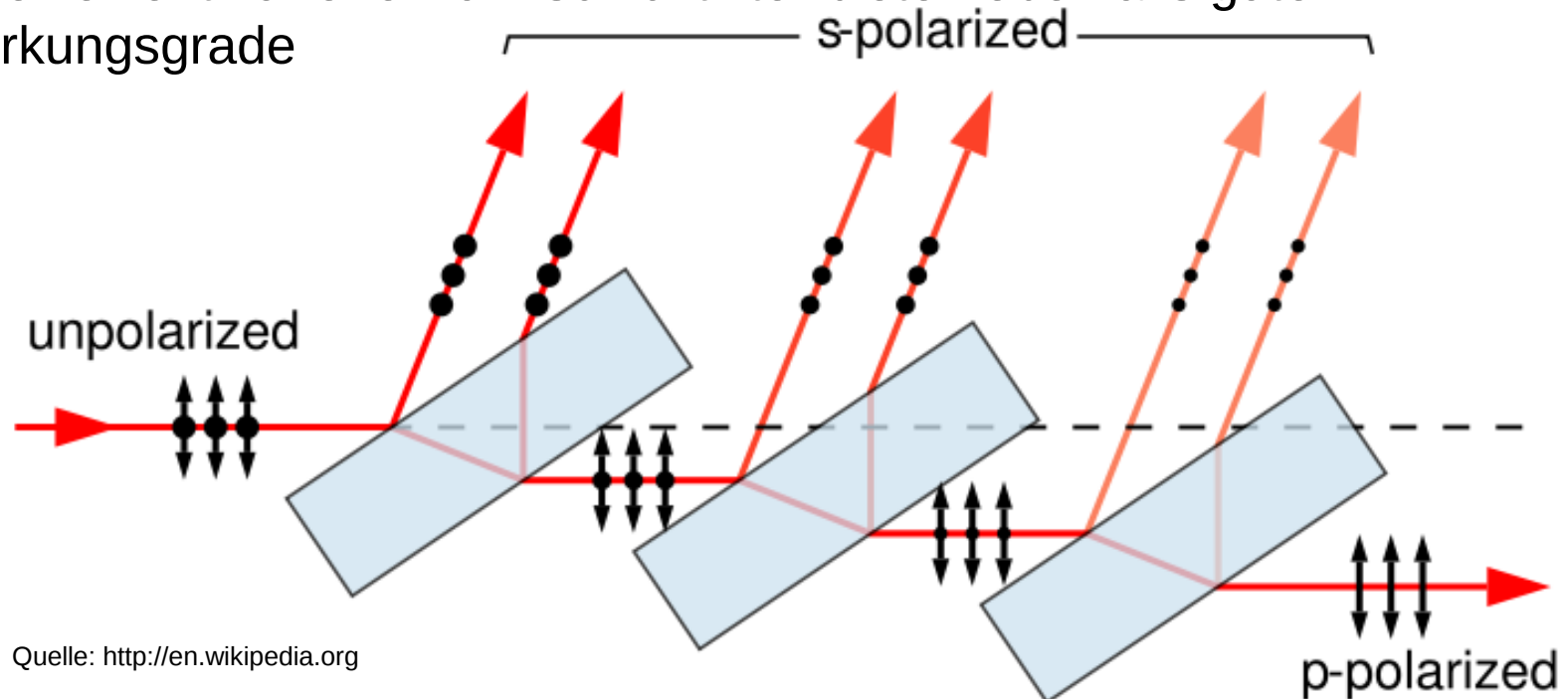
Imaginärteil von n (Absorption)

$\Rightarrow$ Dichroismus

■ **Dichroismus führt ebenfalls zu einer Polarisation durch Absorption**

Polarisation durch Reflexion

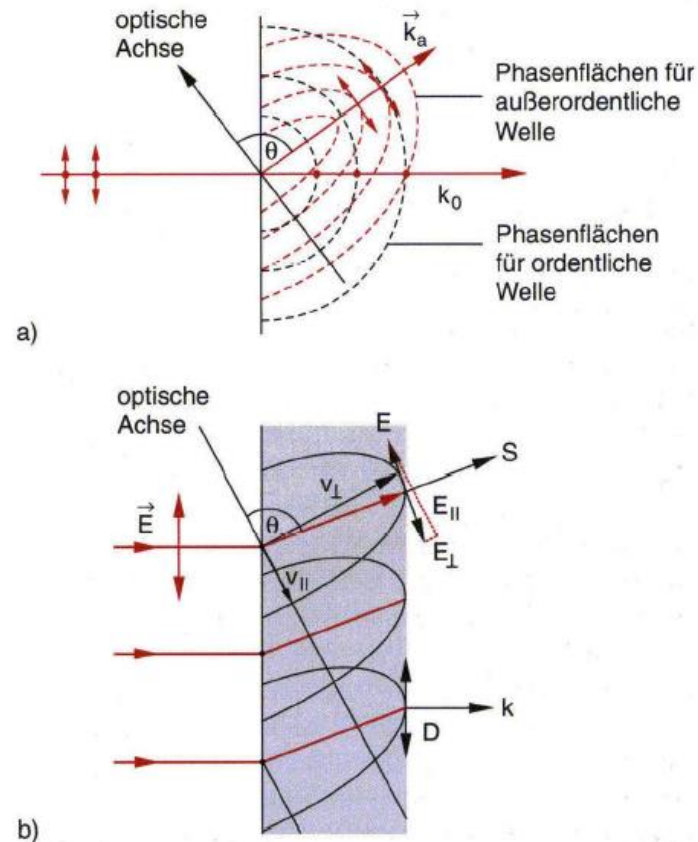
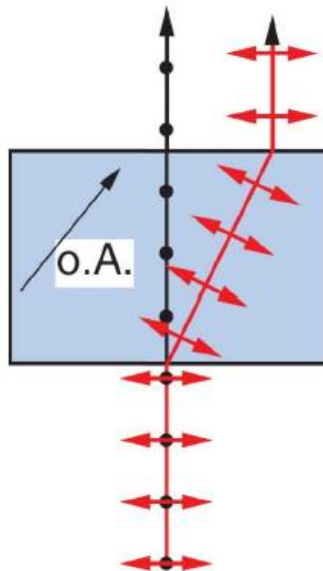
- Bei Lichteinfall unter dem Brewster-Winkel wird nur s-polarisiertes Licht reflektiert, d.h. reflektiertes Licht ist polarisiert.
- Durch Folge von transparenten Platten kann auch transmittierter Strahl polarisiert werden.
 - Größere Einfallswinkel sind hier günstiger als der Brewster-Winkel
- Speziell entworfene Dünnschichtfilter bieten ebenfalls gute Wirkungsgrade



Quelle: <http://en.wikipedia.org>

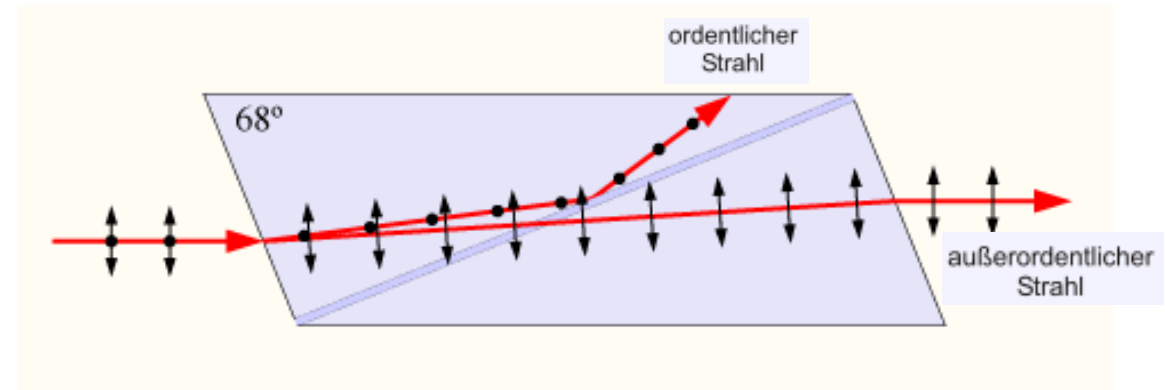
Anisotrope Materialien

Doppelbrechung $\Leftrightarrow$ ein unpolarisierter Lichtstrahl wird beim Durchgang durch einen einachsigen Kristall in zwei zueinander orthogonal polarisierte Strahlen (ordentlicher und außerordentlicher) aufgespaltet; für den außerordentlichen Strahl gilt das Brechungsgesetz nicht !

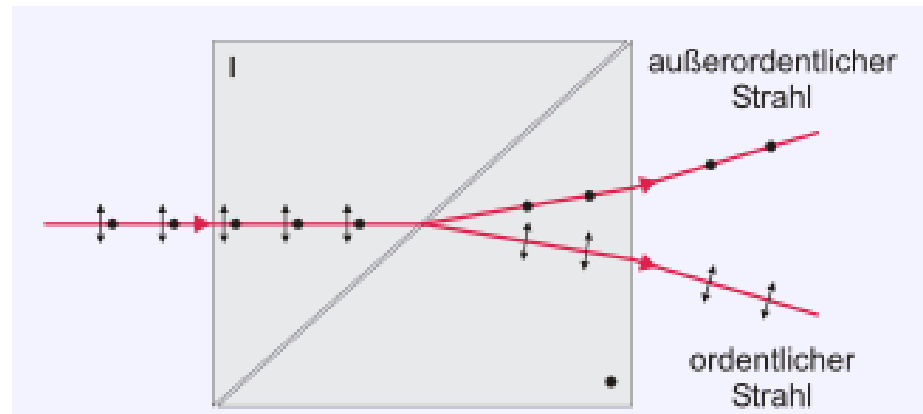


Polarisation durch Doppelbrechung

- Nicolsches Prisma
 - Totalreflexion für ordentlichen Strahl



- Wollaston Prisma
 - 15° bis 45° Divergenzwinkel

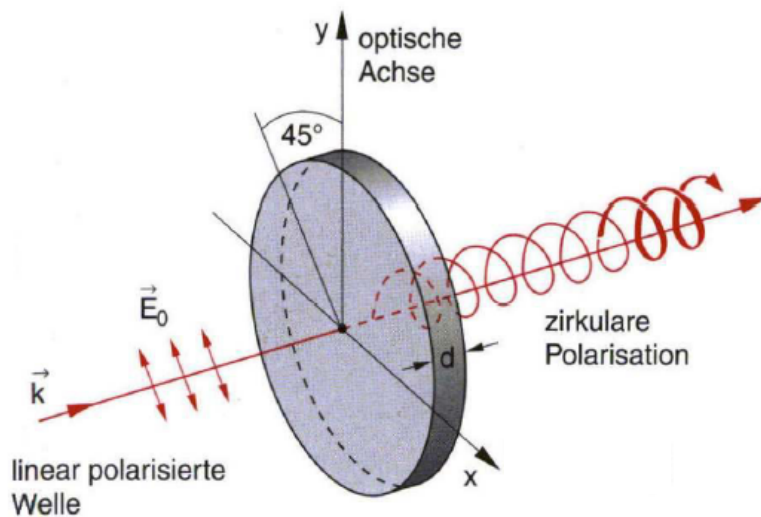


- Viele andere polarisierende Prismentypen existieren mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln und Strahlaustrittspositionen

$\lambda/4$ -Platte

Zirkularpolarisator bzw. $\lambda/4$ -Platte:

Erzeugung von zirkular polarisiertem Licht



Eingangspolarisation linear, $\alpha=45^\circ$,
Platte bewirkt Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen E_x und E_y :

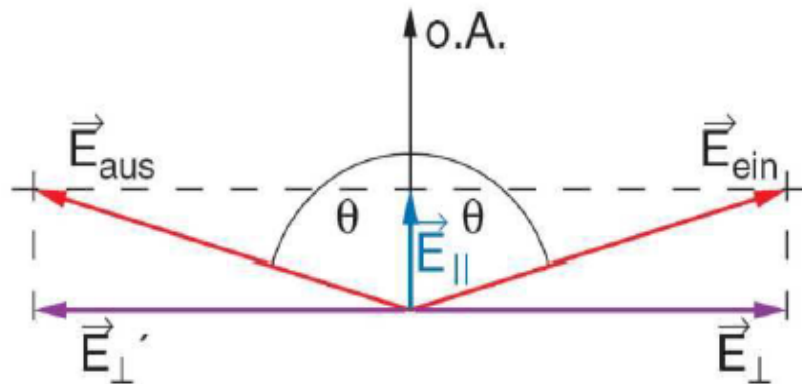
$$\Delta\varphi = k_o d - k_a d = \frac{2\pi d}{\lambda_0} (n_o - n_a)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow d \cdot (n_o - n_a) = \frac{\lambda_0}{4}$$

$\lambda/2$ -Platte

Polarisationsdreher bzw. $\lambda/2$ -Platte:

Drehung der Schwingungsebene linear polarisierten Lichtes



Eingangspolarisation linear unter Winkel θ zur opt. Achse; Platte bewirkt Phasenverschiebung $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \pi \quad \Leftrightarrow \quad d \cdot (n_o - n_a) = \frac{\lambda_0}{2}$$

$$E_{\perp}' = -E \sin \theta; \quad E_{\perp} = E \sin \theta \quad \Rightarrow \quad \underline{\text{Polarisationsebene um } 2\theta \text{ gedreht!}}$$

Inhalt

- Grundlagen
- Reflexion & Brechung
- Absorption
- Spiegel
- Prismen & Linsen
- Polarisation
- Beugung & Interferenz

Beugung & Interferenz



Quelle: www.gymnasium-gerlingen.de

Beugung & Interferenz

Die Wellennatur des Lichtes ist nicht mehr zu vernachlässigen, sobald die Objekte / Strukturen sind im Größenordnungsbereich der Lichtwellenlänge befinden oder beispielsweise makroskopische Strukturen für Bedingungen von stehenden Wellen sorgen.

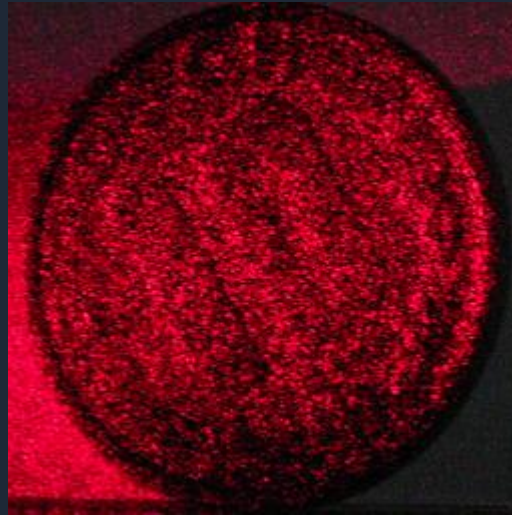
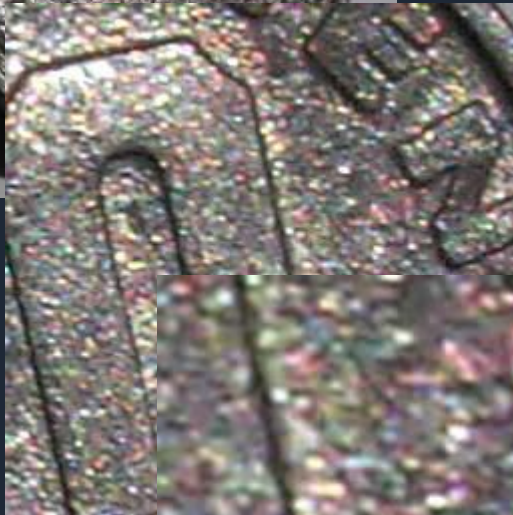
Die Wellenoptik ist unter Anderem essenziell für:

- Mikroskopie: Auflösung eines Mikroskops
- Spektroskopie: Interferenzgitter
- Strahlfokussierung: Beugungsbegrenzung von Foki
- Datenspeicherung: CD, DVD, Holographie
- Laser: z.B. Speckle, Resonatoren ...
- Messtechnik: z.B. Newton Ringe ...
- Mikro- und Nanooptik: Steuerung von Licht durch Diffraktion
- Herstellungstechnik: z.B. opt. Lithographie ...

Beugung & Interferenz: Alltagsbeispiele



Groschen im
Sonnenlicht



Groschen im
Laserlicht



Beugung an einer
Gardine



Beugung an
einem Loch



Quelle: www.itp.uni-hannover.de

Beugung und Interferenz

Wann tritt Beugung und Interferenz auf?

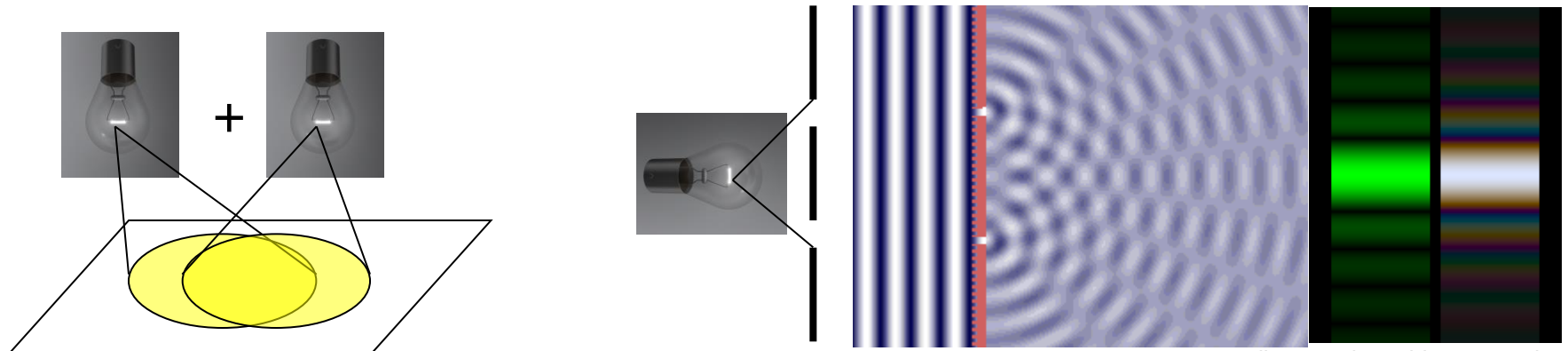
Immer Wenn sich zwei Wellen aus einer (Beugung) oder (virtuell) verschiedener Lichtquellen (Interferenz) überlagern.

Aber:

⇒ Überlagert man das Licht zweier Glühlampen, so addieren sich die Intensitäten. Man erkennt keine Interferenzeffekte!

⇒ Überlagert man das Licht einer Glühlampe mit sich selbst, (Doppelspaltexperiment), so treten Interferenzmuster auf!

Unterschied: Kohärenz!



Quelle: www.itp.uni-hannover.de

Kohärenz

- Kohärenz zweier Lichtwellen:
 - Sie können stationäre Interferenzerscheinungen erzeugen.
 - = Die Zeitabhängigkeit ihrer Amplitude darf sich nur um einen konstanten Phasenfaktor unterscheiden.

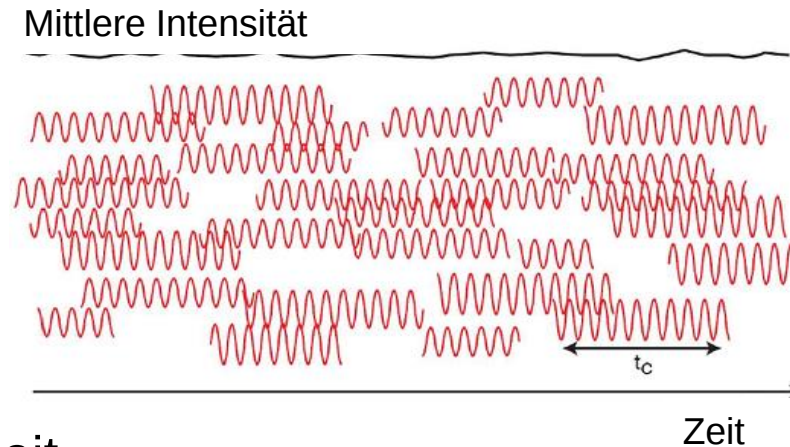
- Kohärentes Licht
 - Kann mit sich selbst zur Interferenz gebracht werden.
 - = Besitzt definierte Phase.

- „Natürliches“ Licht besteht zumeist aus Wellenzügen, kurzen Pulsen, die in sich kohärent sind. Ihre Phasenbeziehung zueinander ist jedoch statistisch.

Kohärenz

■ Monochromatisches Licht aus klassischer Lichtquelle:

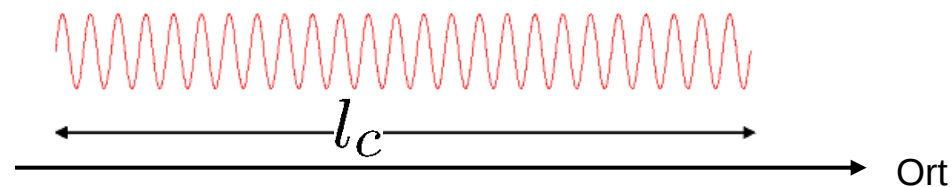
Die Überlagerung von kurzen Wellenzügen ergibt eine zeitlich konstante mittlere Intensität.



■ Kohärenzlänge, Kohärenzzeit

Die Wellenzüge sind in sich kohärent, ihre Phasenbeziehung zueinander ist jedoch statistisch.

- Die Kohärenzlänge beschreibt, wie lang die Pulse im Mittel sind.



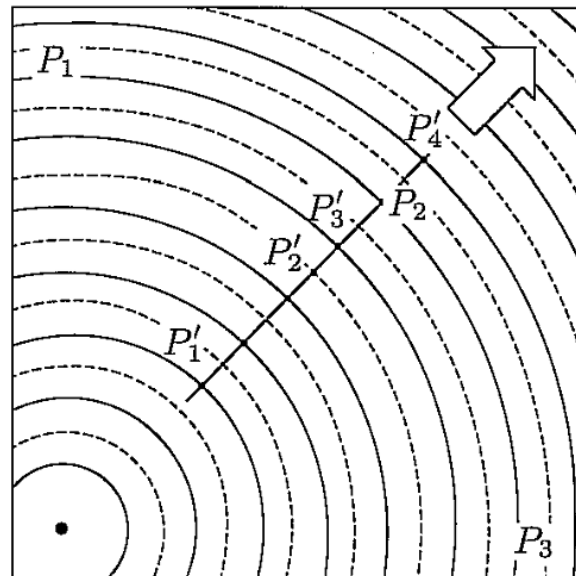
$$t_c = \frac{l_c}{c}$$

- Die zugehörige Zeit heißt Kohärenzzeit

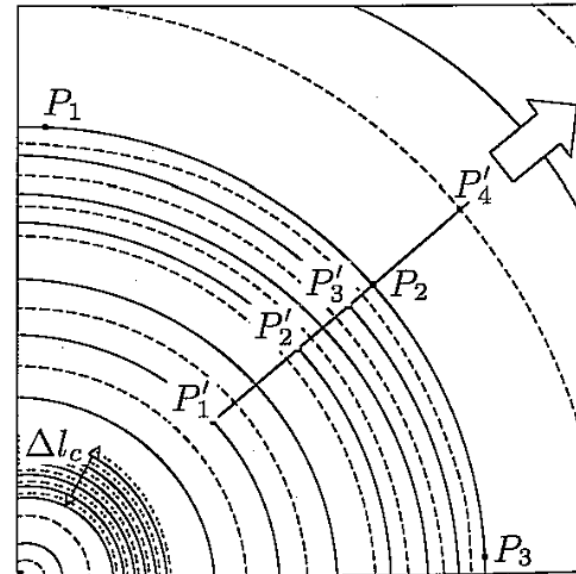
Quelle: www.physik.uni-halle.de/

Kohärenz

Zeitliche und räumliche Kohärenz



(a)



(b)

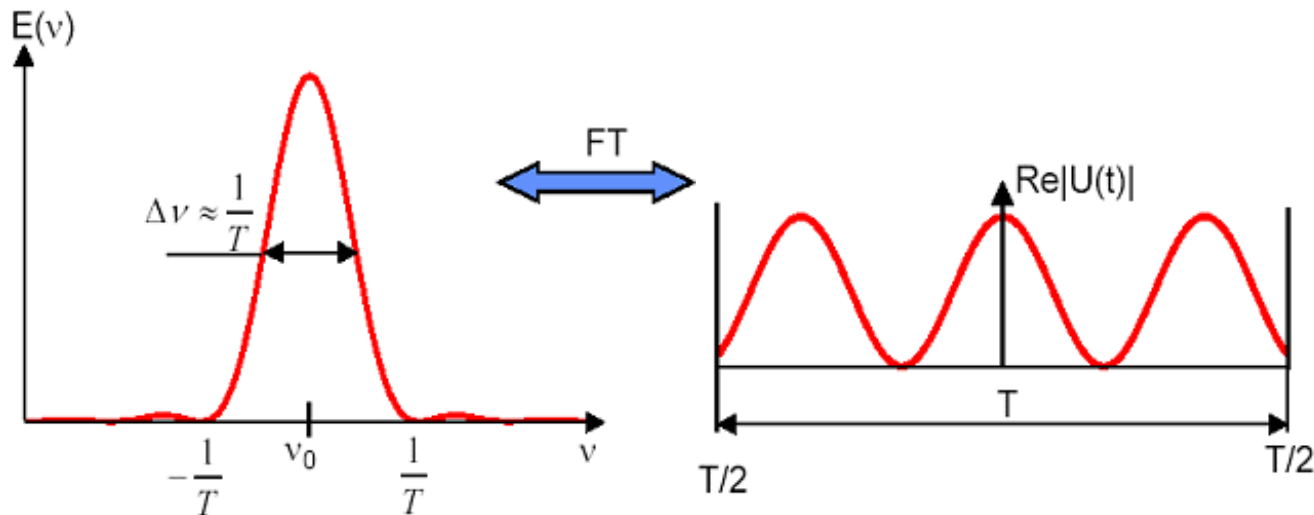
Bild 9.4: Zeitliche und räumliche Kohärenz. (a) Die Wellen sind in beider Hinsicht vollständig kohärent. (b) Die Wellen sind räumlich vollständig, zeitlich hingegen nur teilweise kohärent.

Quelle: „Optik“ E. Hecht

Kohärenz

Die Kohärenzzeit, bzw. Kohärenzlänge lässt sich aus dem Spektrum gewinnen.

- Je schmalbandiger, desto länger die Kohärenzzeit $t_c = \frac{1}{\Delta\nu}$



- Kohärenzlänge: $l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$

Quelle: www.physik.uni-halle.de/

Kohärenz

Einige typische Kohärenzlängen

Glühlampe	2,5 μ m
Hg-Höchstdrucklampe (546nm Linie)	20 μ m
Hg-Niederdrucklampe (546nm Linie)	6cm
Kr-Isotopenlampe (Kr86, 606nm)	60-80cm
III-V Halbleiterlaser	> einige cm
HeNe-Laser, 1m Resonator	20cm
HeNe-Laser, stabilisiert, Longitudinalmode	>5m

Kohärenz

Erzeugung von kohärenten (Teil-)Wellen zur Beobachtung von Interferenzen:

- a) phasenstarre Kopplung der Lichtquellen – bei Lasern technisch möglich, aber sehr aufwändig
- b) Aufspaltung, des Lichtes von *einer* Quelle in zwei oder mehr Teilwellen, die dann nach unterschiedlichen Wegen überlagert werden $\Rightarrow$ Standard-Methode zur Beobachtung von Interferenzen, auch mit Laser als Quelle

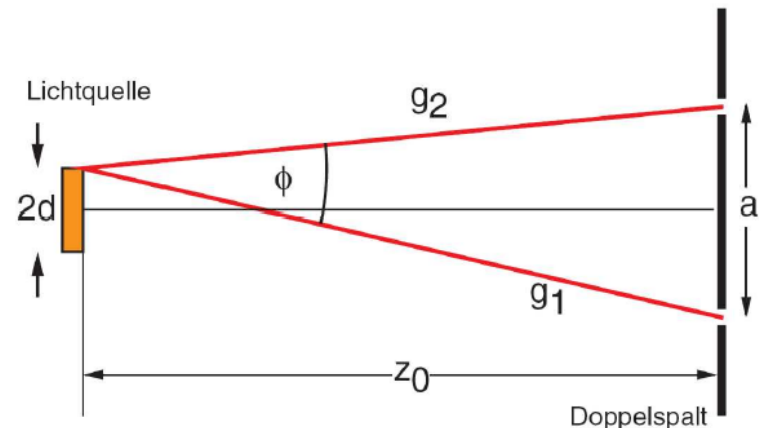
Aufgrund der geringen Kohärenzlänge von weißem Licht beobachtet man Interferenzphänomene mit Umgebungslicht nur bei sehr dünnen Schichten oder bei nahezu gleichen Wegen der Teilwellen (Wegunterschied $<$ Kohärenzlänge)

Räumliche Kohärenz

Reale, nicht punktförmige Lichtquellen emittieren an unterschiedlichen Stellen mit statistischer Phasenlage

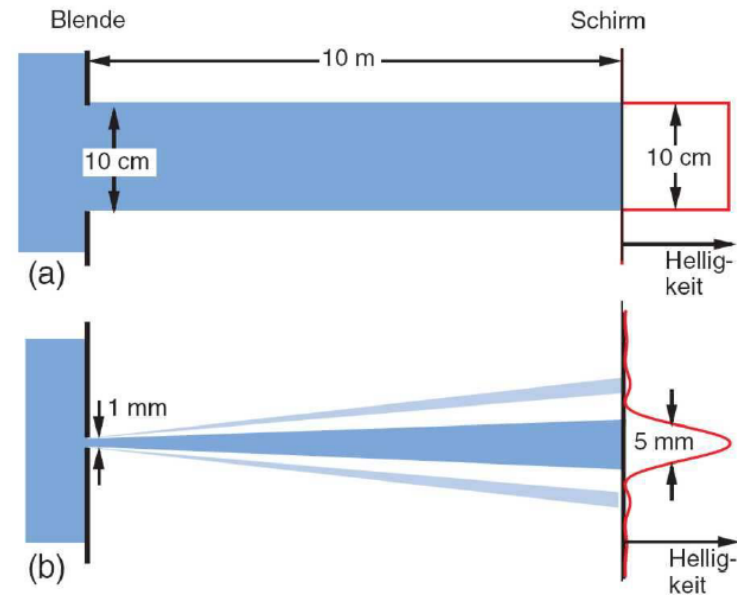
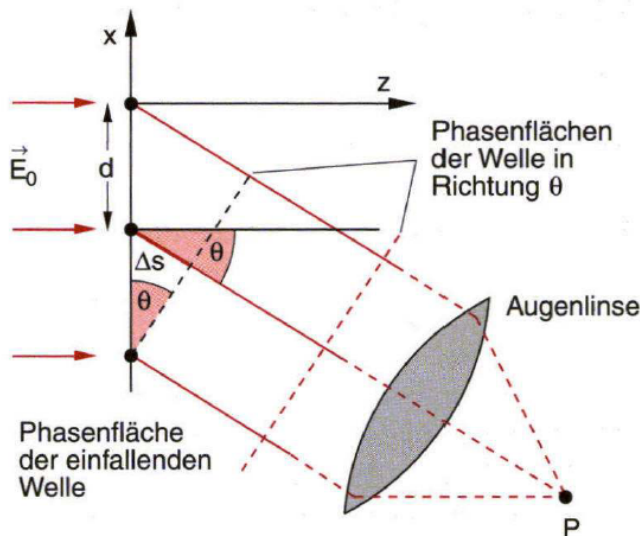
$\Rightarrow$ Interferenzen nur beobachtbar, wenn

$$\Delta g = |g_2 - g_1| \cong \frac{a d}{z_0} \ll \frac{\lambda}{2} \quad \text{bzw.} \quad \phi \ll \frac{\lambda}{2 d}$$



Beugung

Beugung: Licht wird nach Durchgang durch begrenzende Öffnungen oder Vorbeilaufen an Kanten teilweise abgelenkt, d.h. es gelangt auch in solche Bereiche, in die es nach der geometrischen Optik nicht kommen dürfte.



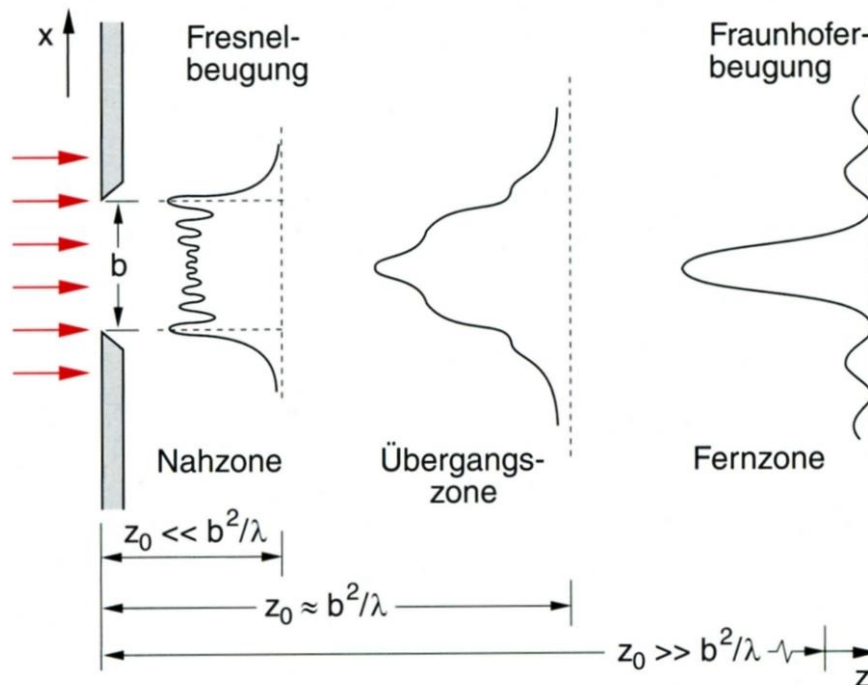
Betrachtung als Interferenzphänomen:
N Oszillatoren in Ebene $z = z_0$ strahlen nach Anregung durch ebene Wellen gleichphasig ab; in Richtung θ haben die benachbarten Teilwellen einen Phasenunterschied von

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin \theta$$

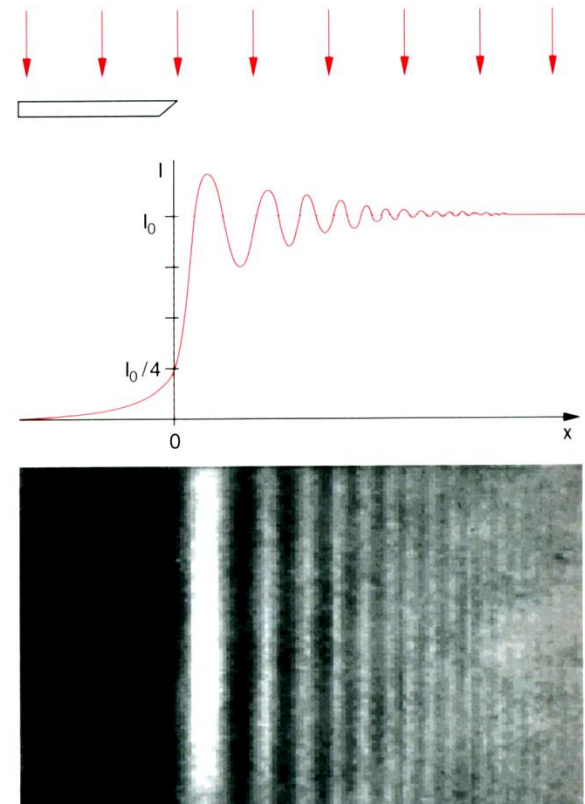
Beugung

■ Fraunhoferbeugung: Fernzone

■ Fresnelbeugung: Nahzone
(Notwendig, um beispielsweise Beugung an einer Kante zu verstehen)

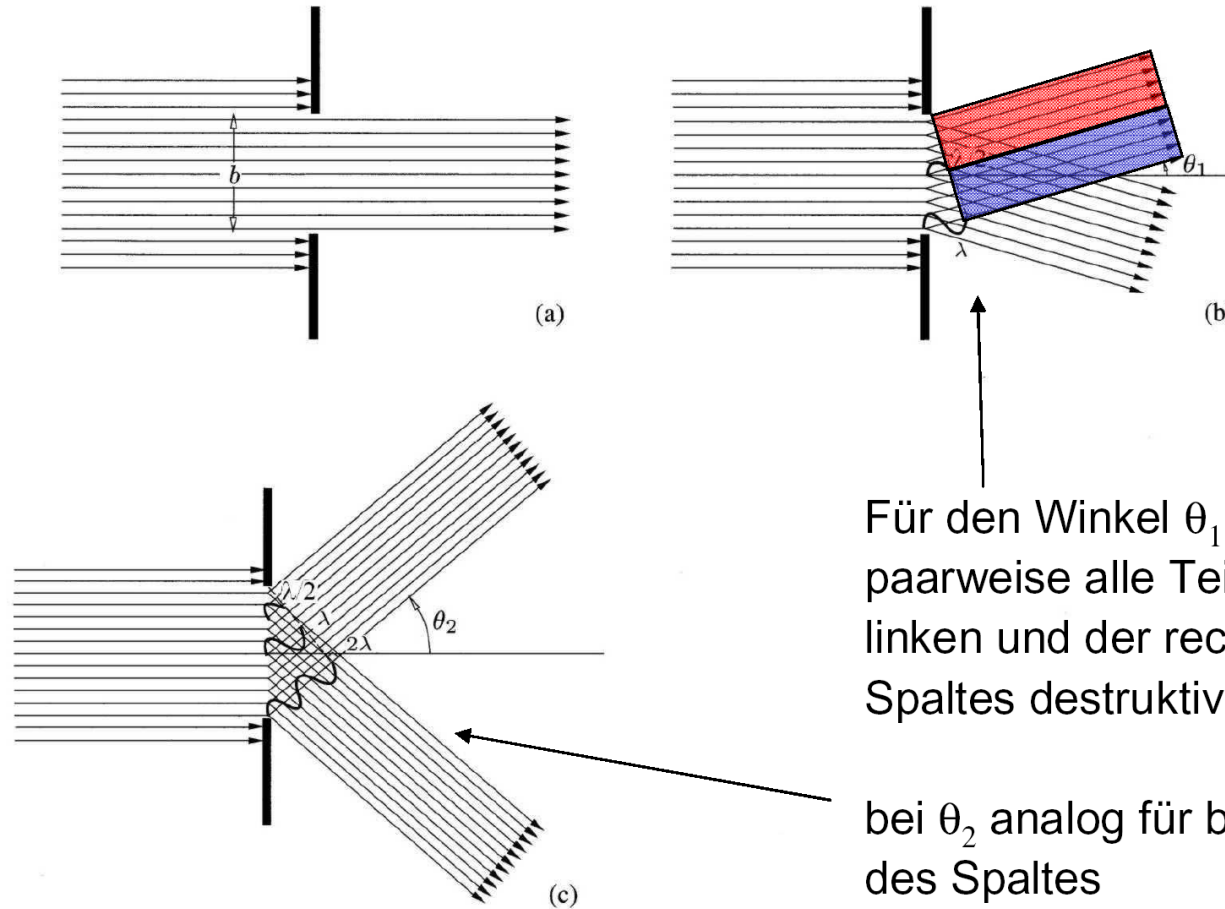


Quelle: Demtröder „Experimentalphysik 2“



Beugung

Anschauliche Erklärung für Minima:



Für den Winkel θ_1 überlagern sich paarweise alle Teilstrahlen aus der linken und der rechten Hälfte des Spaltes destruktiv $\Rightarrow$ Minimum

bei θ_2 analog für benachbarte Viertel des Spaltes

Mathematische Beschreibung der Beugung

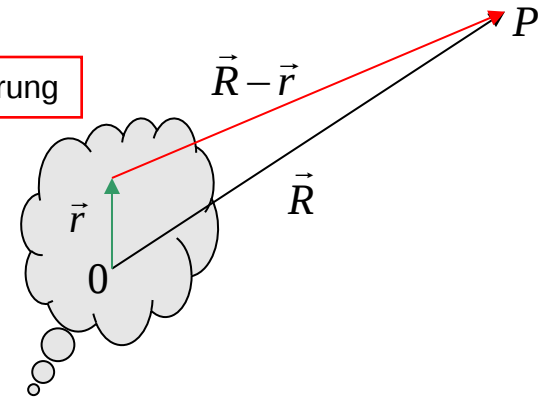
- Kohärente (Kugel-) Wellen, welche von verschiedenen Raumpunkten $\vec{r}$ ausgesandt werden treffen sich am Punkt P im Abstand $\vec{R}$ und überlagern sich dort. Dabei stellt ρ die räumlich Verteilungsfunktion der emittierenden Punkte dar.

$$A(\vec{r})_P = \rho(\vec{r}) \cdot \frac{e^{-i\vec{k}(\vec{R}-\vec{r})}}{|\vec{R}-\vec{r}|}$$

$$A_P = C \int d^3r \cdot A(\vec{r})_P = C \int d^3r \cdot \rho(\vec{r}) \cdot \frac{e^{-i\vec{k}(\vec{R}-\vec{r})}}{|\vec{R}-\vec{r}|} \quad , \quad R \gg r$$

$$\mapsto A_P \approx \frac{e^{-i\vec{k}\vec{R}}}{R} C \int d^3r \cdot \rho(\vec{r}) \cdot e^{i\vec{k}\vec{r}} = \frac{e^{-i\vec{k}\vec{R}}}{R} \cdot C \cdot F(\rho(\vec{r}), \vec{k})$$

Fraunhofer Näherung



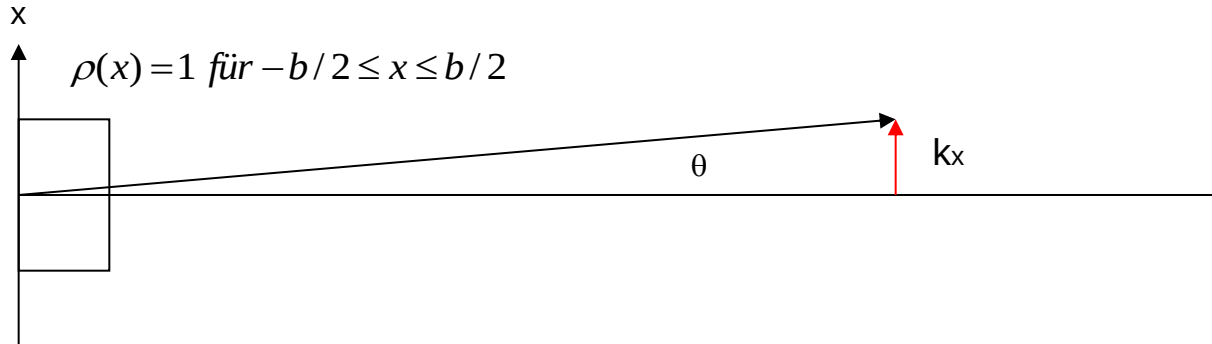
- Die Intensität am Punkt P ergibt sich aus dem Betragsquadrat der Amplitude:

$$I = |A_P|^2 = \frac{C^2}{R^2} |F(\rho(\vec{r}), \vec{k})|^2 \propto |F(\rho(\vec{r}), \vec{k})|^2$$

- Damit ist das Beugungsbild proportional dem Quadrat der Fouriertransformation der jeweiligen Verteilungsfunktion der emittierenden räumlichen Punkte.

Beugung am Spalt

■ Eindimensionales Problem:



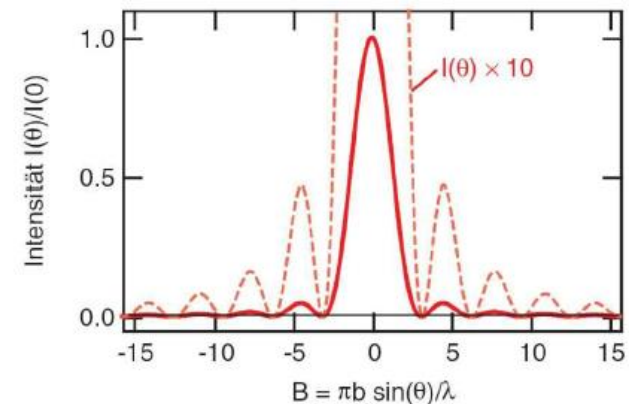
$$F(\rho(x), k_x) = \int \rho(x) e^{-ik_x x} dx = \int_{-b/2}^{b/2} e^{-ik_x x} dx = -\frac{1}{ik_x} e^{-ik_x x} \Big|_{-b/2}^{b/2} = -\frac{1}{ik_x} (e^{-ik_x b/2} - e^{ik_x b/2}) = b/2 \frac{1}{ik_x b/2} (-2i \sin(k_x b/2))$$

$$I \propto |F(\rho(x), k_x)|^2 = b^2 \left(\frac{\sin k_x b/2}{k_x b/2} \right)^2 \propto \left(\frac{\sin k_x b/2}{k_x b/2} \right)^2 = \left(\frac{\sin(bk \sin \theta / 2)}{bk \sin \theta / 2} \right)^2$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\frac{I_{sp}(\theta)}{I_{sp}(0)} = \left(\frac{\sin(\pi(b/\lambda) \sin \theta)}{\pi(b/\lambda) \sin \theta} \right)^2 = \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2$$

Intensitätsminima mit $I = 0$ treten auf,
wenn $\sin(x) = 0$ und gleichzeitig $x \neq 0$:



Beugung am Spalt

Bedingung für
Minima:

$$\sin \theta_{Min} = \pm \frac{n \cdot \lambda}{b}; \quad \text{mit } n = 1, 2, \dots$$

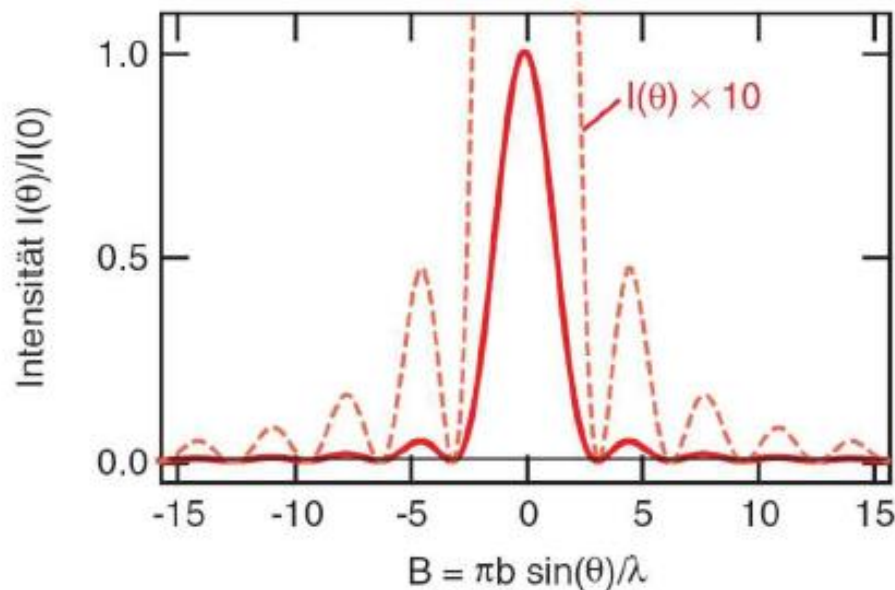
Nebenmaxima
entstehen
bei $\tan x = x$:

$$\sin \theta_{Max} = \pm 1.43 \frac{\lambda}{b}; \quad \pm 2.46 \frac{\lambda}{b};$$

$$I(\theta_{Max})/I_0 = 0.047 \quad 0.017$$

$n \geq 3$:

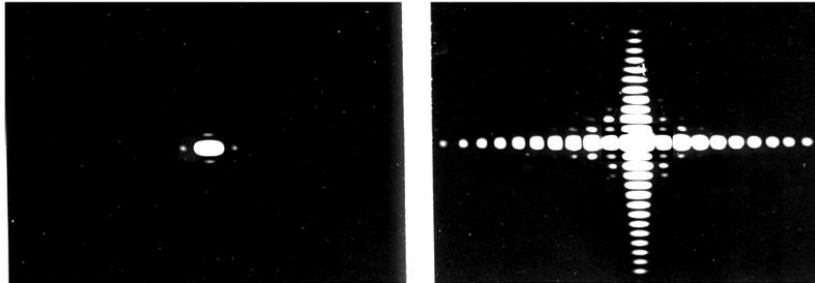
$$\sin \theta_{Max,n} \approx \pm \frac{2n+1}{2} \frac{\lambda}{b}$$



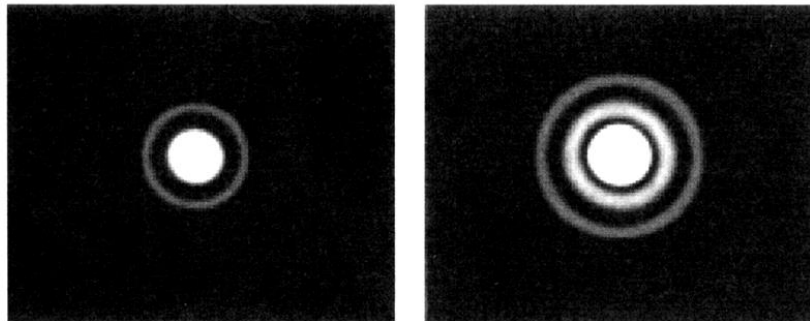
Beugung an Spalten und Blenden

Beugungsmuster an

- Rechteckblende:



- kreisförmiger Blende:



Man beachte:

Licht, das an einem Spiegel reflektiert wird, der die gleiche Form und Größe wie die Blendenöffnung hat, erzeugt in der Reflexion auch exakt das gleiche Beugungsmuster

Beugung an Spalten und Blenden

Für eine kreisförmige Blende mit Radius a (Durchmesser D) ergibt sich für die gebeugte Intensität eine Besselfunktion:

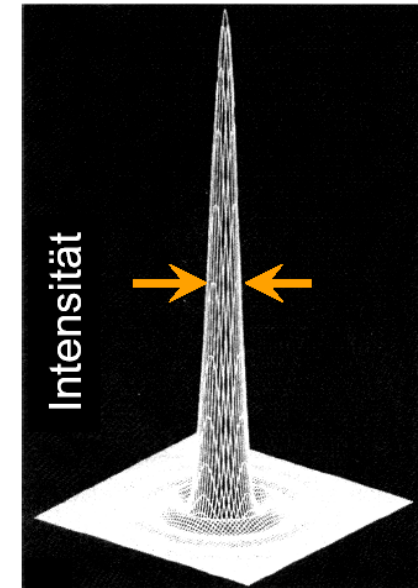
$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \left(\frac{2J_1\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right)^2$$

Dies ergibt Beugungsminima bei:

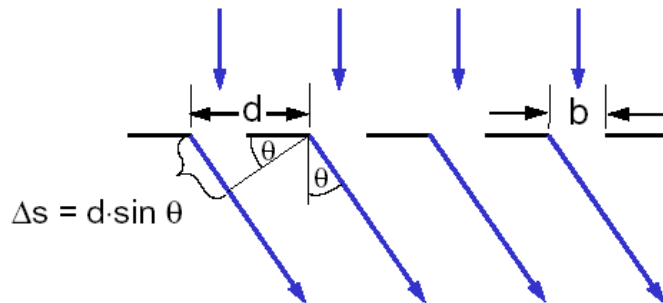
$$\sin \theta_{Min} \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}, 2.23 \frac{\lambda}{D}, \dots, \left(n + \frac{1}{4}\right) \frac{\lambda}{D}$$

Der Radius dieses ersten Minimums entspricht dem Halbwertsdurchmesser des zentralen Maximums und definiert so das kleinstmögliche „Beugungsscheibchen“ bei Abbildungen

⇒ Dieser Effekt limitiert das räumliche Auflösungsvermögen aller optischen Instrumente, da die Richtungsverteilung (Winkeldivergenz) des einfallenden Lichtes durch die Beugung verbreitert wird



Interferenz & Beugung am Gitter



Spaltposition: δ -Funktion

Spaltbreite: Aperturfunktion

Maxima, wenn $\Delta s = d \cdot \sin \theta = m \cdot \lambda$
 $m = 0, 1, 2$

Beugungsgitter:

Für jede regelmäßige Anordnung von $N \geq 2$ parallelen Spalten der Breite b erhält man für eine Intensitätsverteilung, die bestimmt ist durch

- Interferenz zwischen den Bündeln der verschiedenen Spalte und
- Intensitätsverteilung durch Beugung an jedem einzelnen Spalt

Für Spaltbreite b und Abstand d erhält man bei senkrechtem Einfall:

Beugung am Gitter
(N beleuchtete Spalte)

$$\frac{I(\theta)}{I_{\max}} = \frac{1}{N^2} \cdot \frac{\sin^2 [N\pi (d/\lambda) \sin \theta]}{\sin^2 [\pi (d/\lambda) \sin \theta]} \cdot \frac{\sin^2 \pi b / \lambda \sin \theta}{(\pi b / \lambda \sin \theta)^2}$$

Interferenz-
term

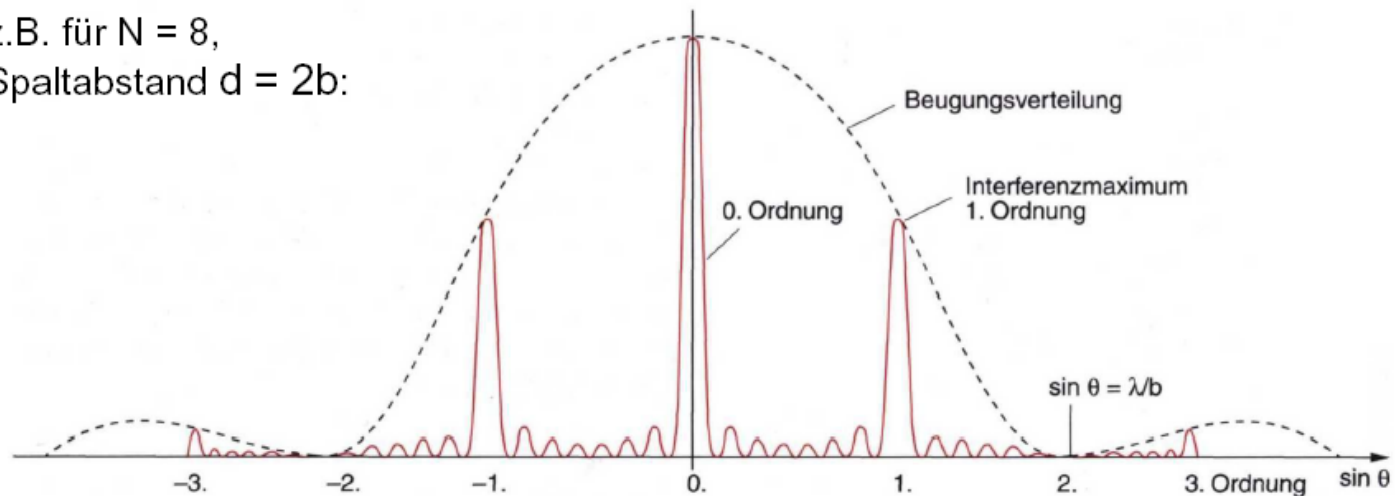
Spalt-
funktion

Interferenz & Beugung am Gitter

Interferenzterm bewirkt:

- Hauptmaxima, wenn Zähler + Nenner gleichzeitig = 0
- (N-1) Minima (Nullstellen der Intensität), wenn Zähler = 0
- (N-2) Nebenmaxima

z.B. für $N = 8$,
Spaltabstand $d = 2b$:



Hauptmaxima kommen durch die konstruktive Interferenz *aller* Teilbündel zustande, bei Nebenmaxima trägt nur ein Teil der Bündel konstruktiv zur Interferenz bei

Interferenz & Beugung am Gitter

Gittergleichung: Die Hauptmaxima liegen bei $\sin[\pi (d/\lambda) \sin \theta] = 0$
das heißt für senkrechten Einfall:

$$\sin \theta = \pm \frac{m \cdot \lambda}{d}; \quad \text{mit } m = 0, 1, 2, \dots$$

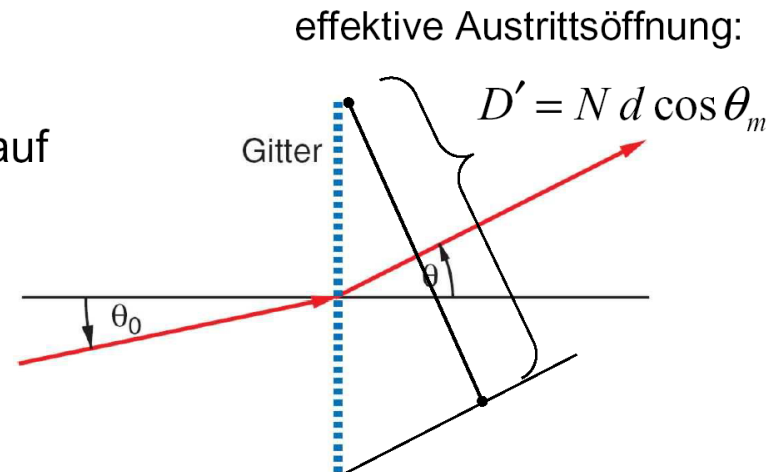
im allgemeinen Fall (Einfallswinkel θ_0 auf Gitter berücksichtigt):

$$(\sin \theta - \sin \theta_0) = \pm \frac{m \cdot \lambda}{d}$$

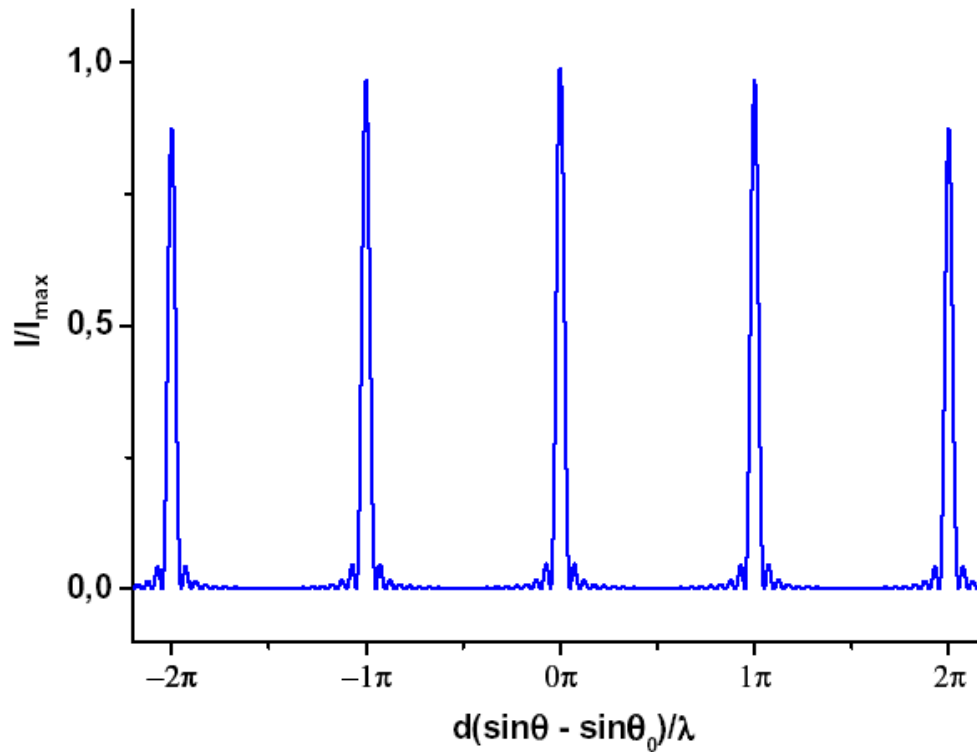
⇒ gilt auch für Reflexionsgitter

Für großes N (Zahl der Spalte bzw. Striche) wird die Breite der Maxima sehr klein; gleichzeitig nimmt die Intensität der Nebenmaxima stark ab, z.B. hat ein Nebenmaximum in der Mitte zwischen 2 Hauptmaxima ca. $1/N^2$ von deren Intensität.

Beides zusammen ermöglicht hohe räumliche oder spektrale Auflösung.



Interferenz & Beugung am Gitter



$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{Nd} \frac{1}{\cos\theta_m} \approx \frac{\lambda}{Nd}$$

⇒ Die Hauptmaxima sind daher umso schmaler, je mehr Spalte zur Interferenz beitragen

Das Beugungsgitter

- spektrales Auflösungsvermögen des Gitters:

Zwei Wellenlängen λ_1, λ_2 sind getrennt beobachtbar („auflösbar“), wenn ihre unterschiedlichen Ablenkwinkel θ_1, θ_2 sich mindestens um die volle Halbwertsbreite $\Delta\theta$ des Hauptmaximums unterscheiden:

$$\sin \theta_{1,2} = \frac{m \cdot \lambda_{1,2}}{d}$$

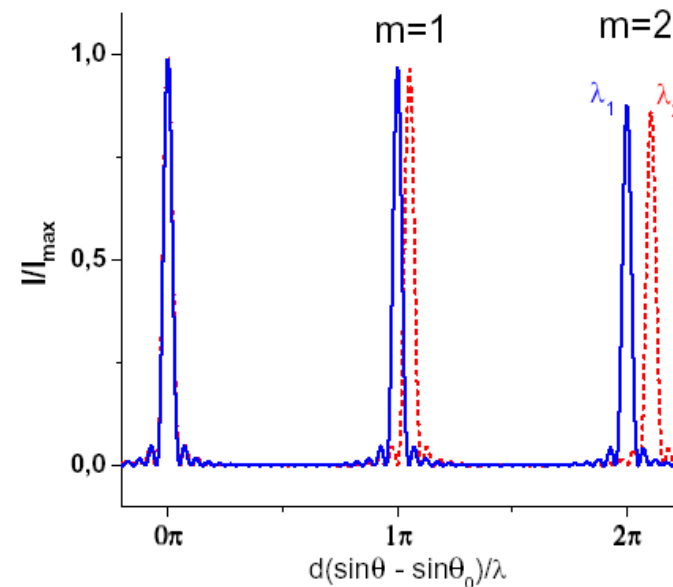
$$\frac{m}{d}(\lambda_1 - \lambda_2) = \frac{m}{d} \Delta\lambda = \sin \theta_1 - \sin \theta_2 =$$

$$= 2 \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \approx \Delta\theta' \cdot \cos \left(\theta_1 + \frac{\Delta\theta'}{2} \right)$$

$$\Delta\theta' \geq \Delta\theta = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta_m} \Rightarrow \frac{m}{d} \Delta\lambda = \frac{\lambda}{Nd} \frac{\cos(\theta_1 + \Delta\theta'/2)}{\cos \theta_1} \approx \frac{\lambda}{Nd}$$

$$\Rightarrow \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m \cdot N$$

Auflösungsvermögen eines Gitters mit N beleuchteten Spalten in m-ter Ordnung



Gittertypen

- Amplitudengitter

Löcher sind Ausgangspunkte von Elementarwellen.



- Phasengitter

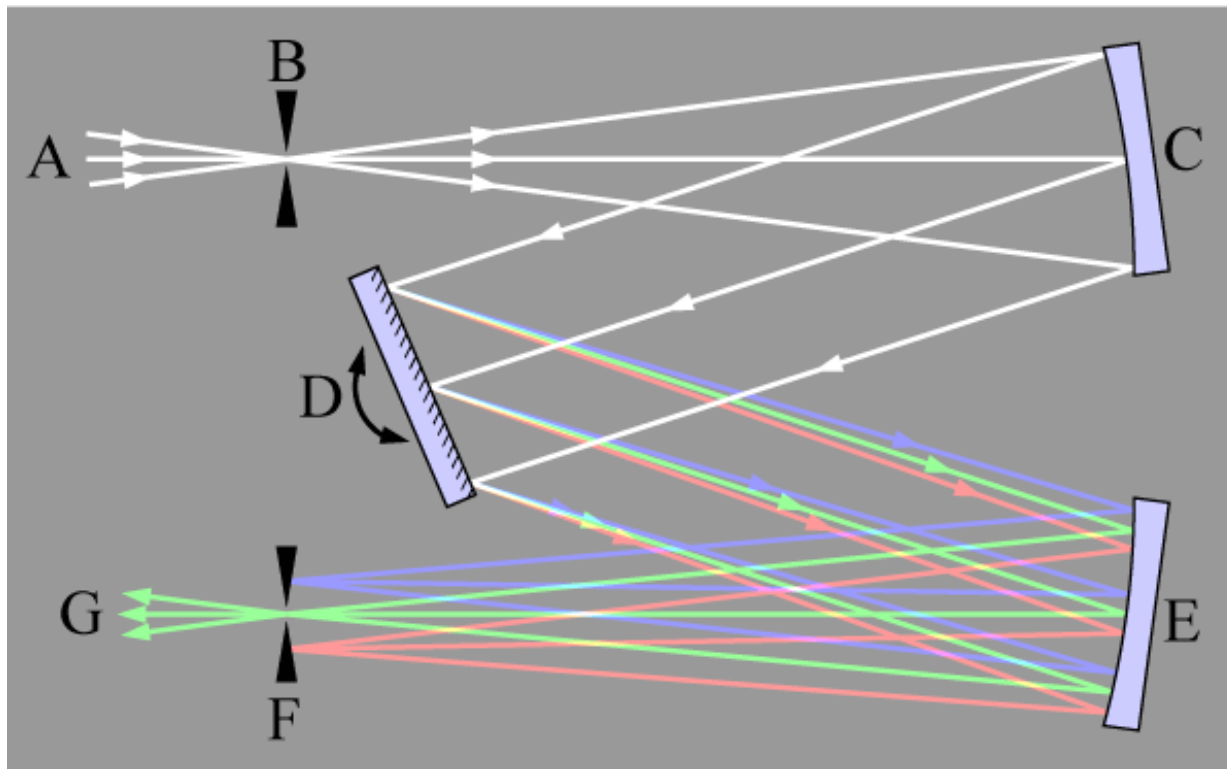
modulation des optischen Weges ! Modulation der Phase



- Reflexionsgitter



Anwendung: Gitterspektrometer



Mehr dazu in der
Vorlesung optische
Messtechnik

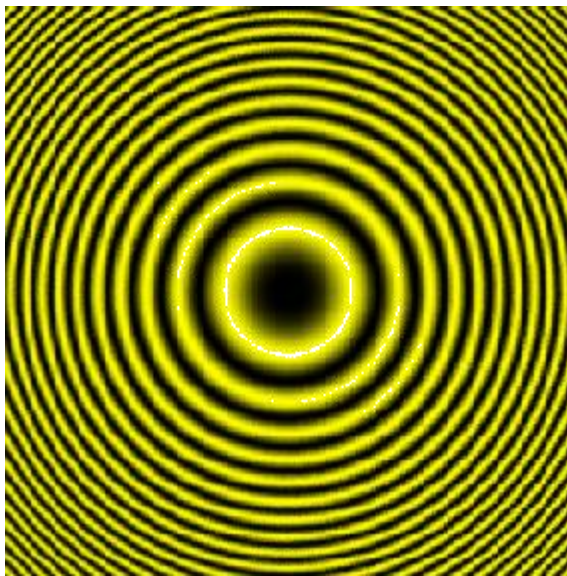
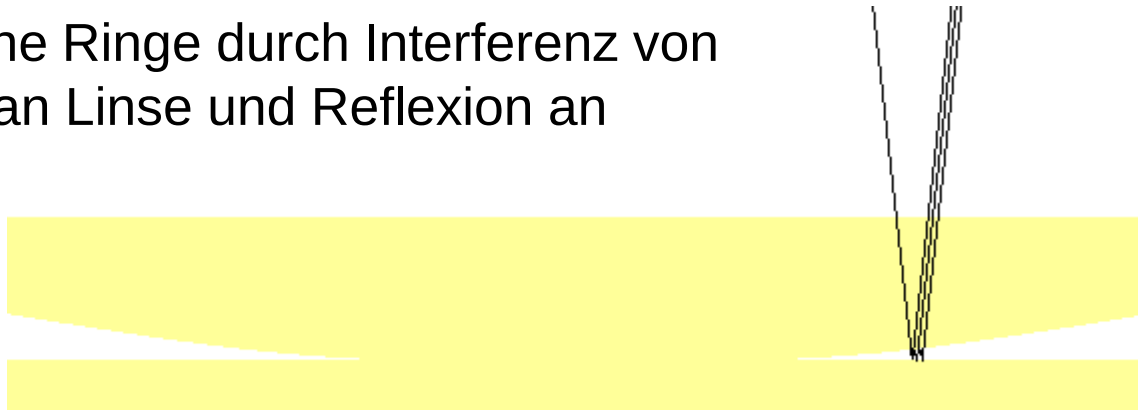
Quelle: www.wikipedia.org



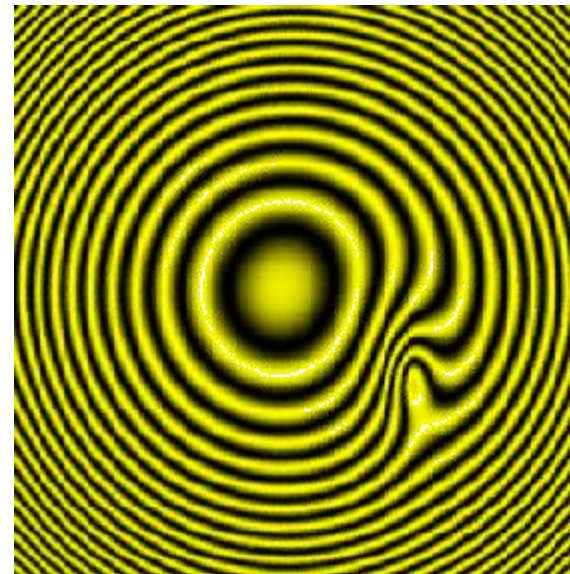
Bild einer Kerze durch ein Transmissionsgitter

Fabry Perot: Newtonsche Ringe

- Newtonsche Ringe durch Interferenz von Reflexion an Linse und Reflexion an Glasplatte



Ohne Fehler



Mit Fehler

Quelle: wwwex.physik.uni-ulm.de

Fermatsches Prinzip

⇒ **Prinzip von Fermat:** Ein Lichtstrahl durchläuft zwischen zwei Punkten P_1 und P_2 stets den Weg, für den die optische Weglänge einen Extremwert (Maximum oder Minimum) annimmt.

$$\delta \int_{P_1}^{P_2} n ds = 0$$

Was bedeutet die Variation des Weges im Wellenbild?

Bei Extremwerten führt die infinitesimale Veränderung des Weges zu keiner Veränderung der Wegstrecke und damit der Laufzeit!

Erklärung des Fermatschen Prinzips

- Annahme: Das Licht „probiert“ alle Wege aus (auch die , welche nach der klassischen Optik gar nicht sinnvoll sind)!
- Bei allen Wegen, außer denen mit einer Variation von Null verändert sich bei einer infinitesimalen Veränderung des Weges auch die Länge der Strecke und damit die Laufzeit.
- Die unterschiedliche Laufzeit führt zu einer Phasenverschiebung der Lichtwelle.
- Die infinitesimal benachbarten, phasenverschobenen Wellen interferieren destruktiv.
- Nur die Wellen in der infinitesimalen Umgebung des Extremums haben keine Phasenverschiebung und interferieren konstruktiv.