

Physik für Maschinenbau

Dr. Thomas Kirn



Vorlesung 12

Wiederholung V11

Lichterzeugung: Wärmestrahlung



Max Planck
1858 - 1947

Schwarzer Körper: → Hohlraumstrahlung

$$u(\lambda) = \frac{dI}{d\lambda}(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

Energie der Photonen

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

Wien'sches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} \cdot T = b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

Stefan – Boltzmann Gesetz:

Integration von $dI/d\lambda \rightarrow I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$

Emissivität ε , $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$

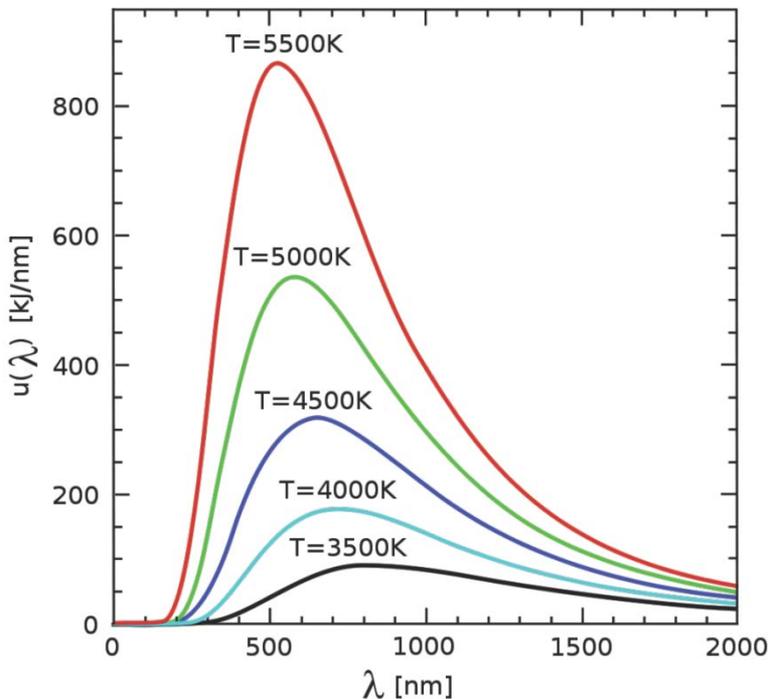
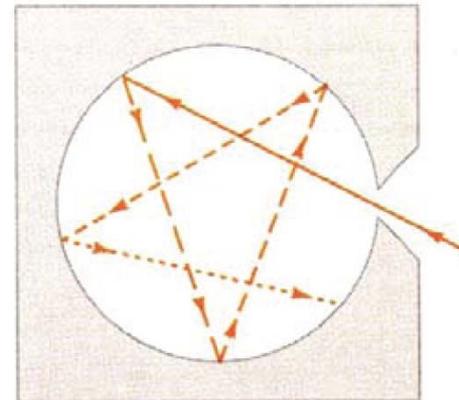
Körper schwarz

$$\rightarrow \varepsilon = 1$$

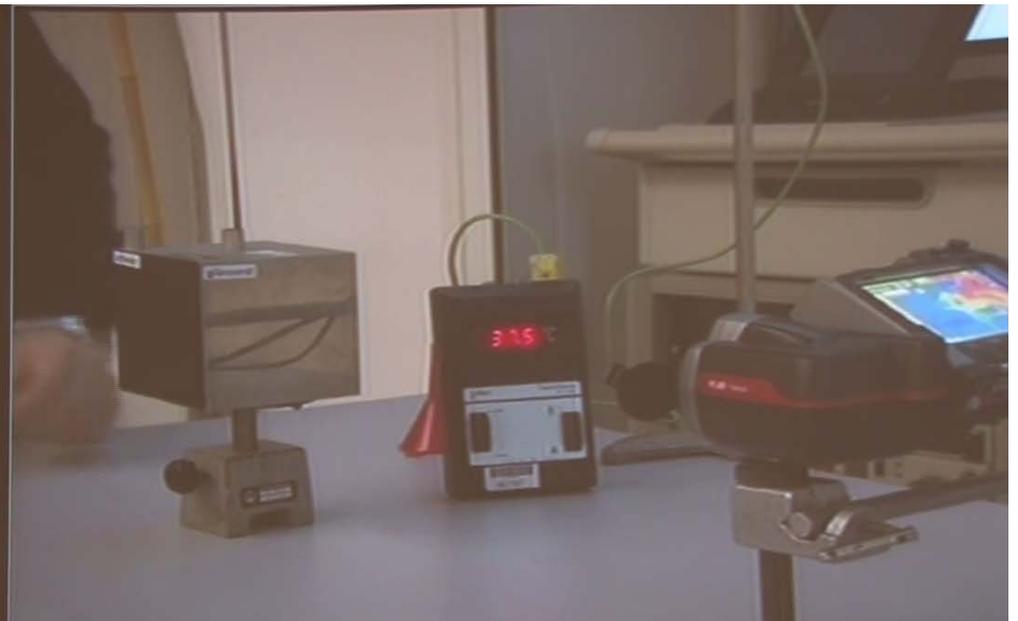
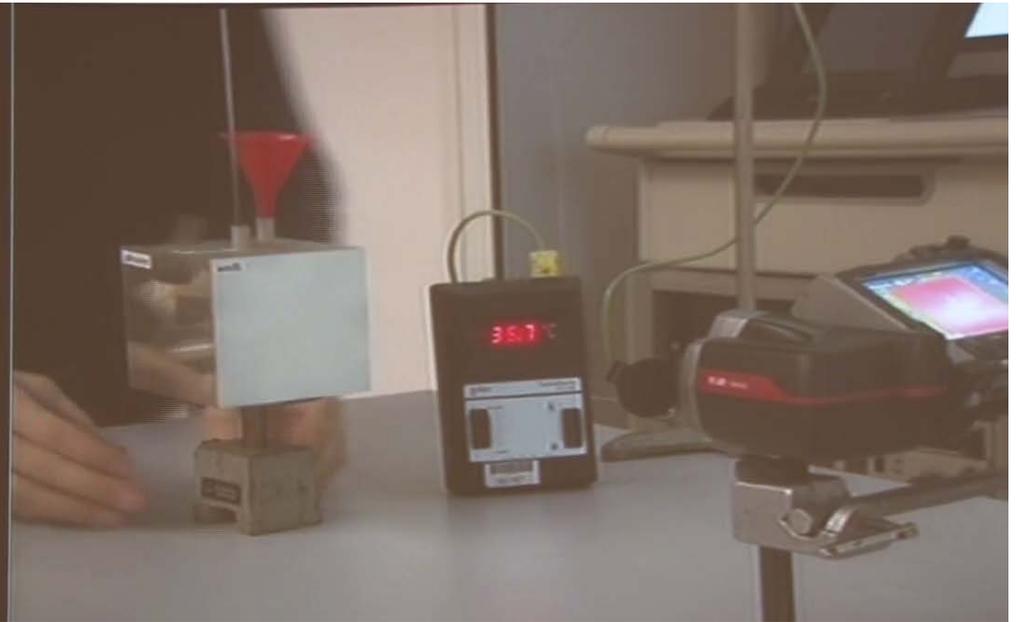
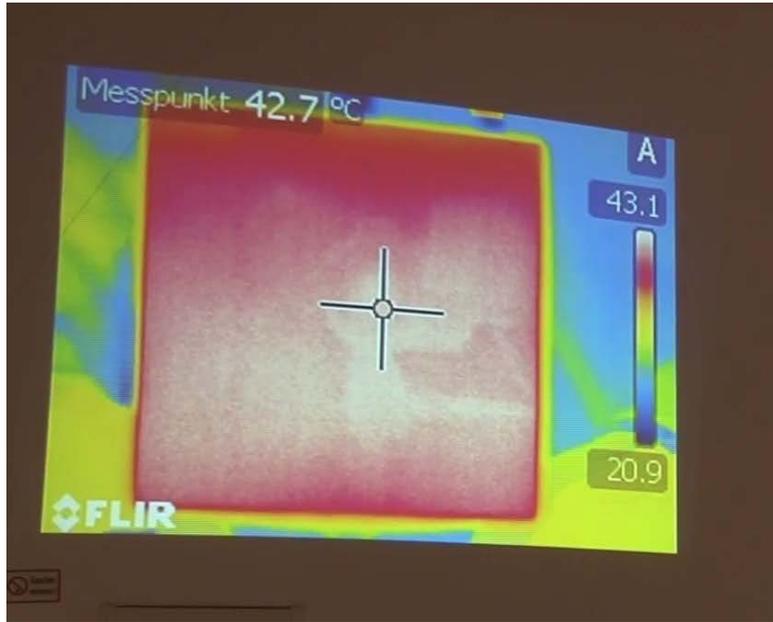
Körper verspiegelt

$$\rightarrow \varepsilon = 0$$

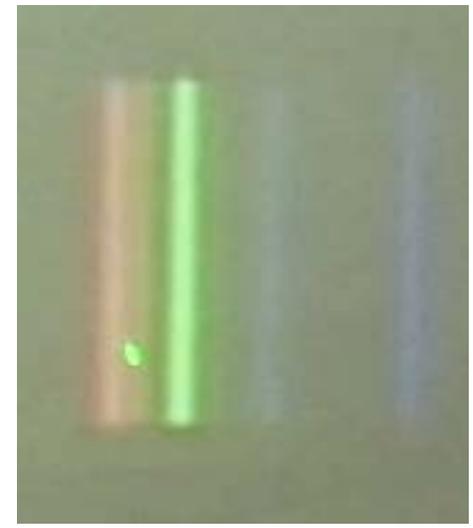
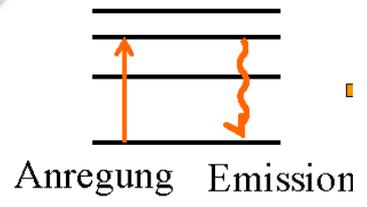
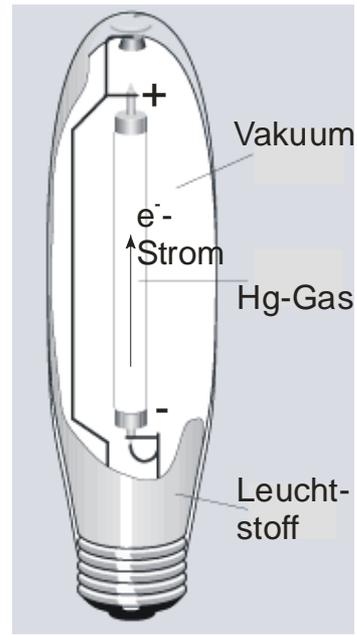
ansonsten $0 < \varepsilon < 1$



Lichterzeugung: Wärmestrahlung



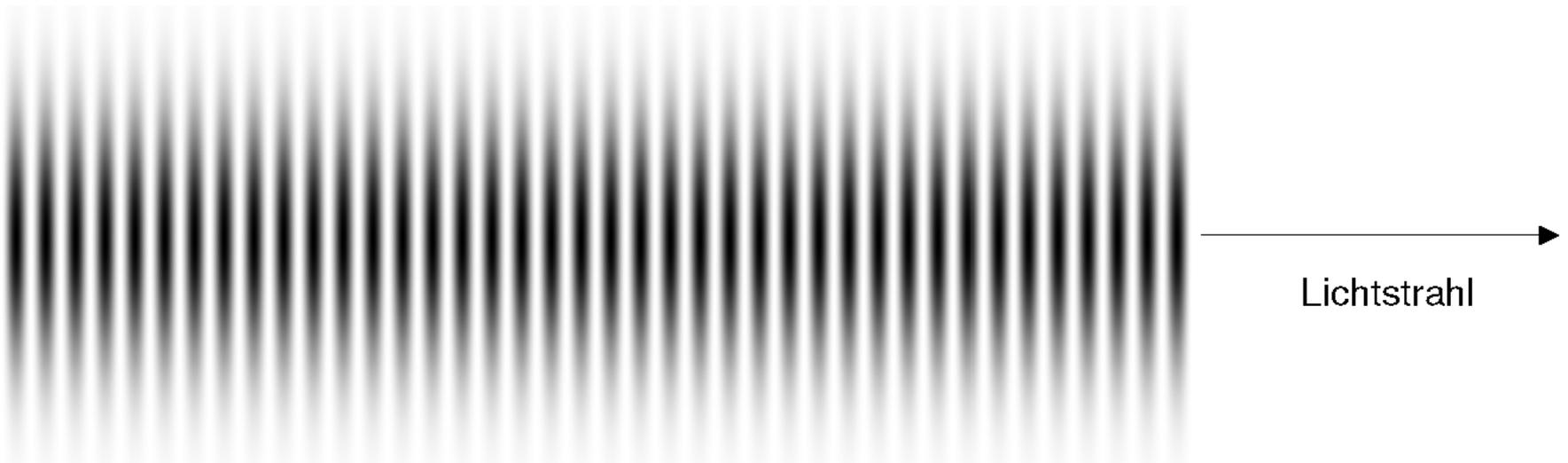
Lichterzeugung: Glühbirne und Spektrallampe



Geometrische Optik

Idealisiertes Gebiet der Optik:

Ausdehnung der Welle und Abmessungen der Objekte groß gegen die Wellenlänge des Lichtes → Vernachlässigung des Wellencharakters (Interferenz, Beugung) des Lichtes bei Ausbreitung

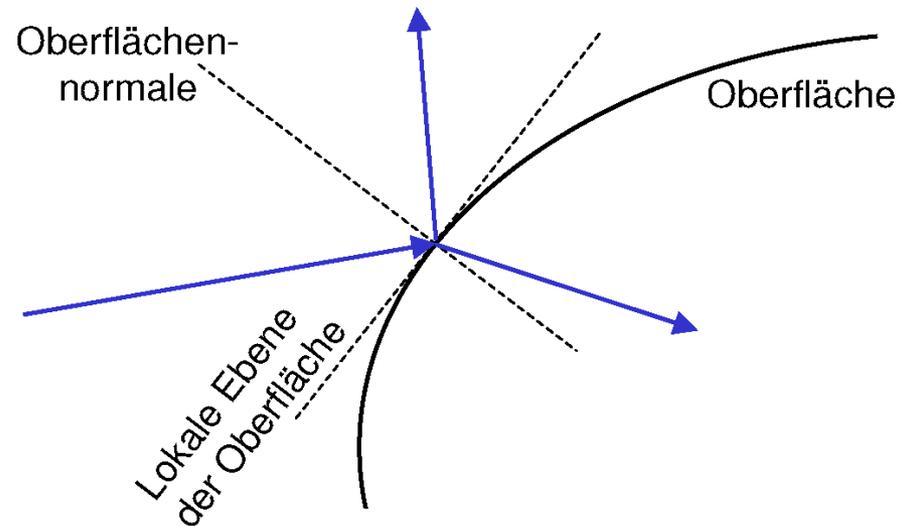


Lichtstrahl: Zuordnung einer Ausbreitungsrichtung, Polarisation, Intensität, Wellenlänge, etc.

Geometrische Optik

Grundregeln der geometrischen Optik:

1. Lichtstrahlen sind Geraden in einem optisch homogenen und isotropen Medium (gilt z.B. nicht in Medien mit ortsabhängiger Dichte).
2. Reflexion der Lichtstrahlen an Grenzflächen gemäß Reflexionsgesetz (Einfallswinkel = Ausfallswinkel gemessen zur Oberflächennormalen)
3. Brechung der Lichtstrahlen gemäß dem Snelliuschen Brechungsgesetz
4. Treffen zwei Strahlenbündel aufeinander und durchdringen sich, so beeinflussen sie sich nicht gegenseitig.



Konzept der optischen Abbildung:

Jeder Punkt eines sichtbaren Objektes strahlt Lichtstrahlen in alle Richtungen ab.

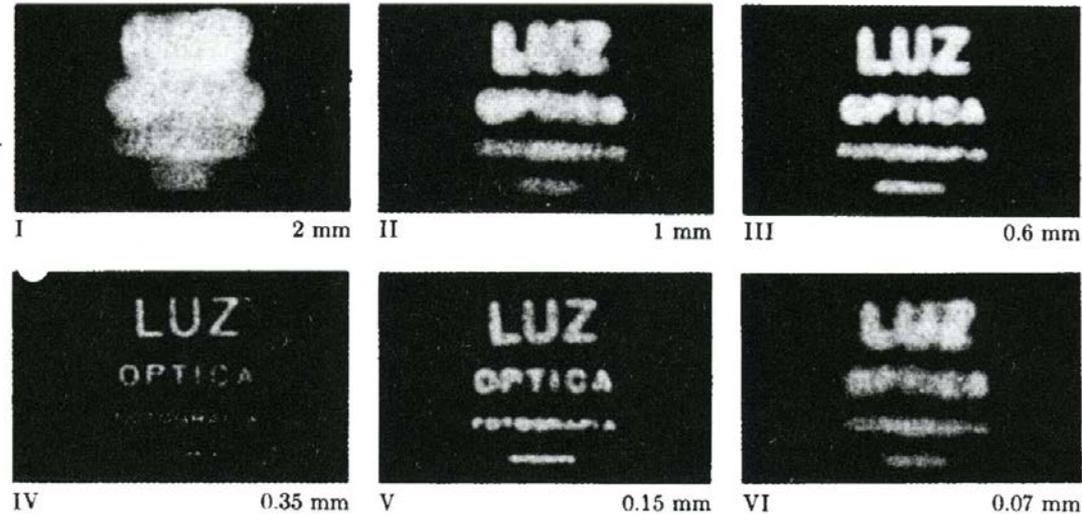
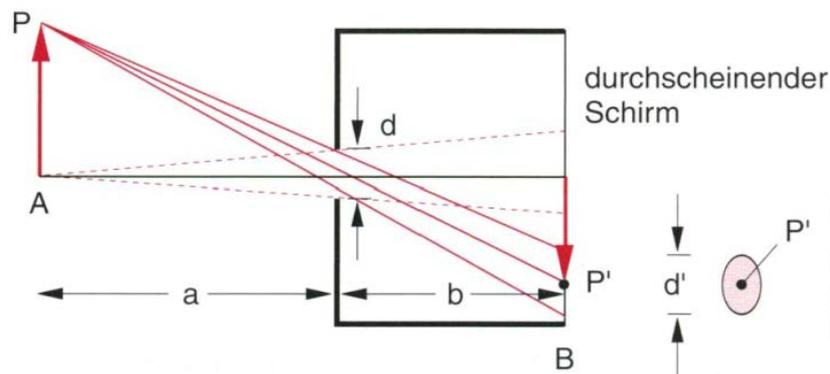
Ziel einer Abbildung ist es:

1. möglichst viele dieser Lichtstrahlen in einem definierten Punkt der Bildebene zu sammeln. (Bildpunkt möglichst hell)
2. alle Lichtstrahlen vom Gegenstandspunkt, die die Bildebene erreichen, in nur einem Bildpunkt zu sammeln. (Bildpunkt möglichst scharf)

Reelles Bild: Ein Bild, das mit einem Schirm aufgefangen werden kann

Virtuelles Bild: Ein Bild, das nicht mit einem Schirm aufgefangen werden kann

Optische Instrumente: Lochkamera



1. Lochdurchmesser d größer: größerer Bildbereich von einem Gegenstandspunkt beleuchtet \rightarrow schlechte Auflösung, Überlapp der Kreisscheiben um P , Bild wird unscharf
2. Lochdurchmesser d so klein wie Wellenlänge λ , dann wird der vom Gegenstandspunkt beleuchtete Bildbereich durch den Beugungswinkel α begrenzt:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d} \quad \rightarrow \text{schlechte Auflösung, Bildpunkt wird mit abnehmendem Lochdurchmesser größer}$$

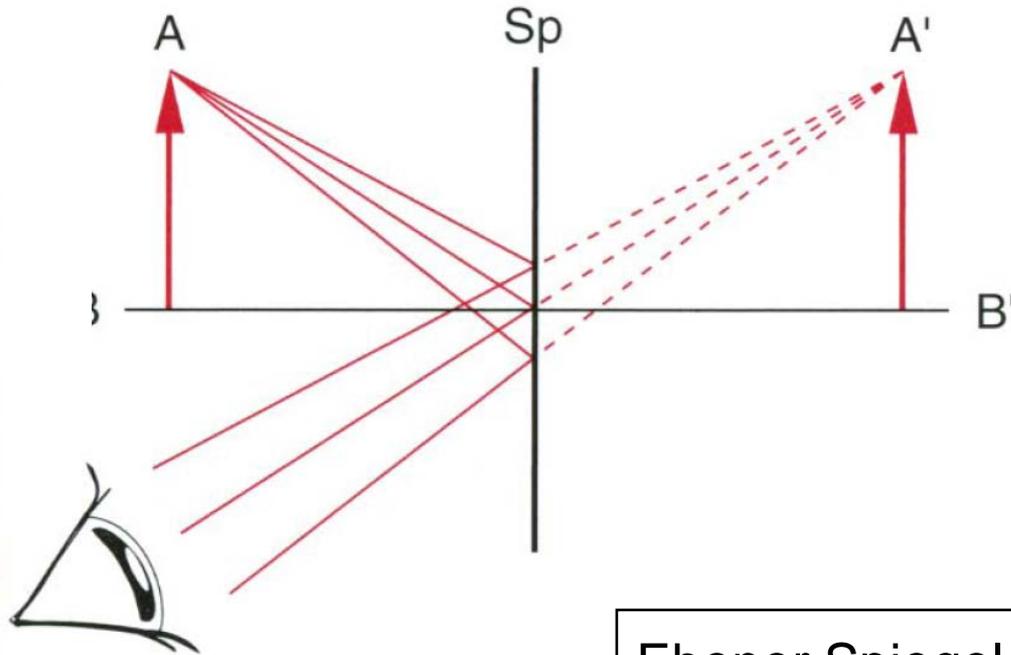
Ideale Blendenöffnungsgröße, abhängig von Abständen zwischen Gegenstand, Blende und Bildebene. Nachteil: Bild extrem lichtschwach!

Vorlesung 12

Spiegel: Ebener Spiegel

Versuch: ebener Spiegel Haftoptik

Einfallswinkel = Ausfallswinkel



Ebener Spiegel erzeugt von ausgedehnten Gegenständen (AB) immer virtuelle Bilder (A B), Abbildung 1:1, rechte und linke Seite des Gegenstandes vertauscht.

Hohlspiegel

Versuch: Sphärischer Hohlspiegel Haftoptik

Sphärischer Hohlspiegel mit Brennpunkt F, Kugelmittelpunkt M, Radius R und Brennweite $f = \overline{OF}$

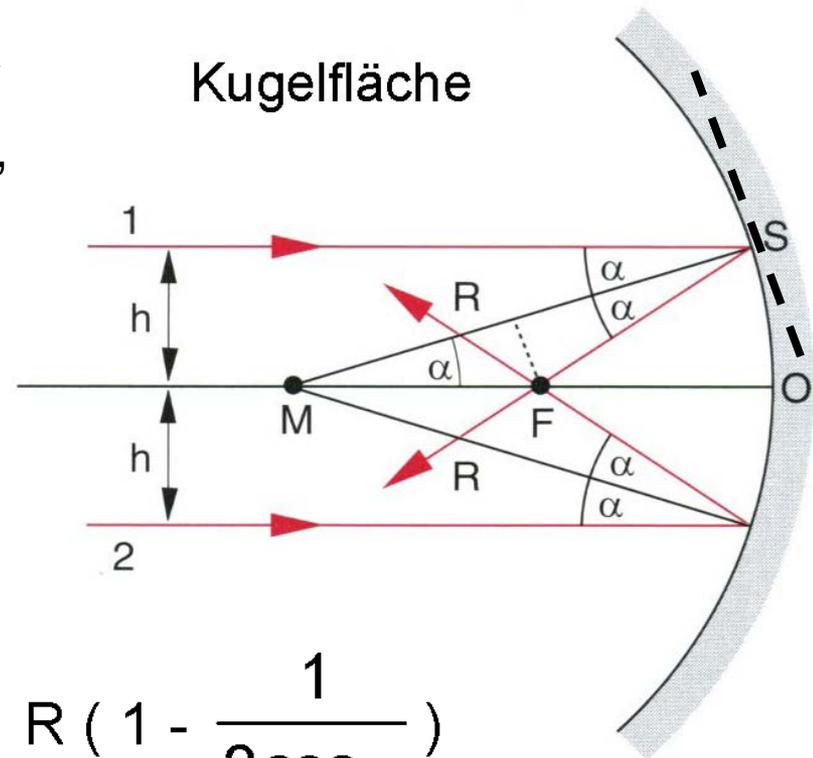
$$\overline{FM} = \frac{R}{2 \cos \alpha}$$

$$f = \overline{OF} = R - \overline{FM} = R - \frac{R}{2 \cos \alpha} = R \left(1 - \frac{1}{2 \cos \alpha} \right)$$

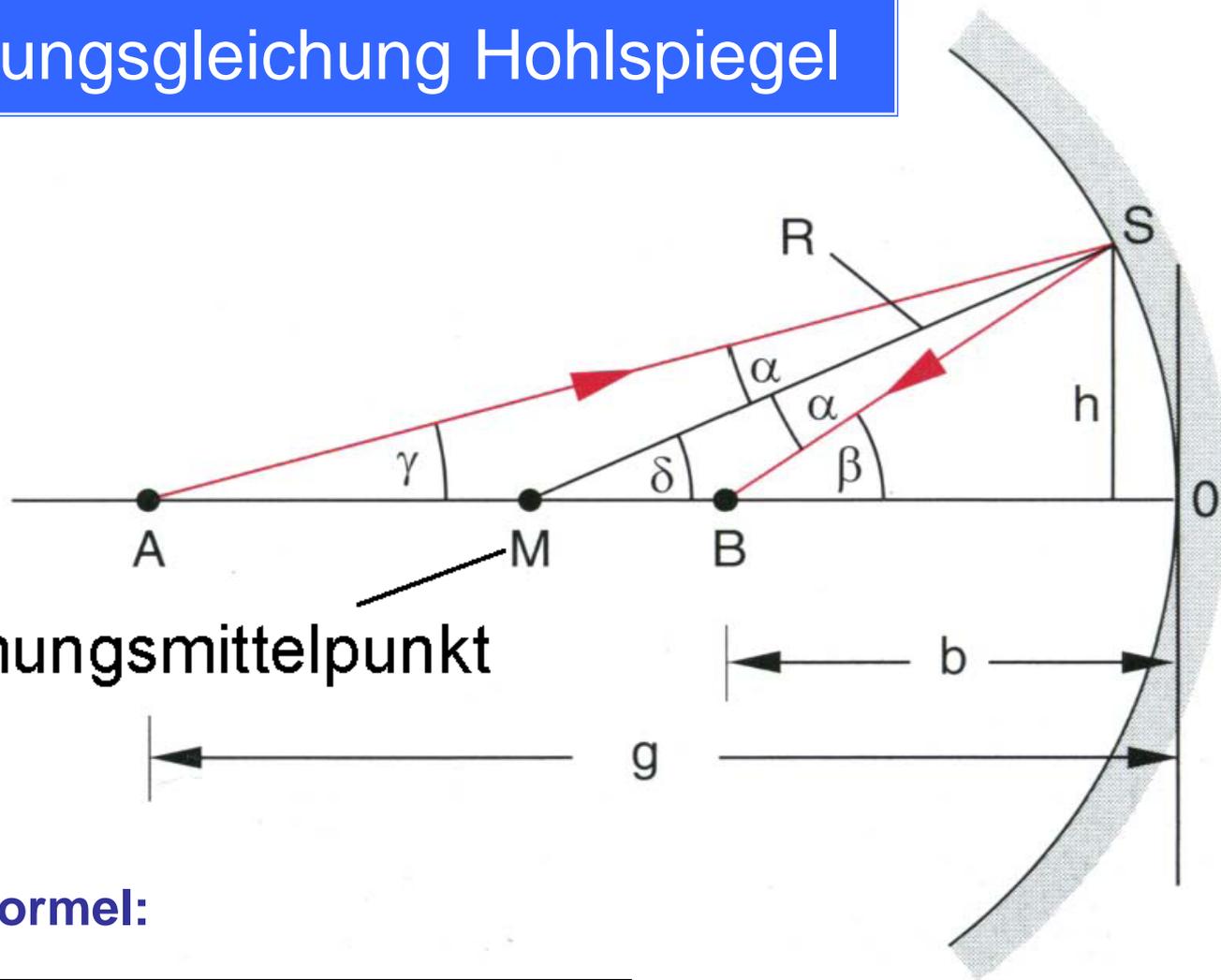
Achsennahe Strahlen:

für kleine Winkel α ($h/R \ll 1$) gilt $\cos \alpha \approx 1$,
achsenparallele Strahlen treffen sich im Brennpunkt F

$$\overline{OF} \approx R/2 = f$$



Abbildungsgleichung Hohlspiegel



Krümmungsmittelpunkt

Hohlspiegelformel:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} \approx \frac{2}{R} \approx \frac{1}{f}$$

$$g \rightarrow \infty, b_{\infty} = R/2 = f$$

$$b \rightarrow \infty, g_{\infty} = R/2 = f$$

Hohlspiegel

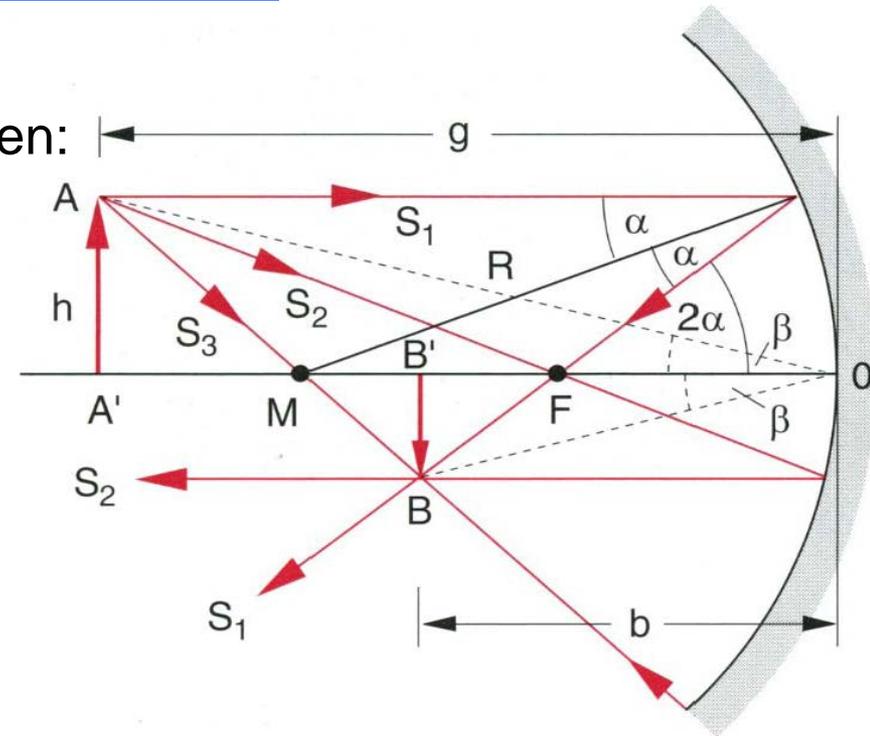
Konstruktion eines Bildpunktes:

Verwendung von zwei der drei Hauptstrahlen:

S1: Achsenparallel einfallender Strahl
wird durch den Brennpunkt reflektiert.

S2: Der durch den Brennpunkt einfallende
Brennpunktstrahl wird achsenparallel
reflektiert (= Umkehrung!)

S3: Der Mittelpunktstrahl durch das Kugel-
zentrum wird in sich selbst reflektiert.



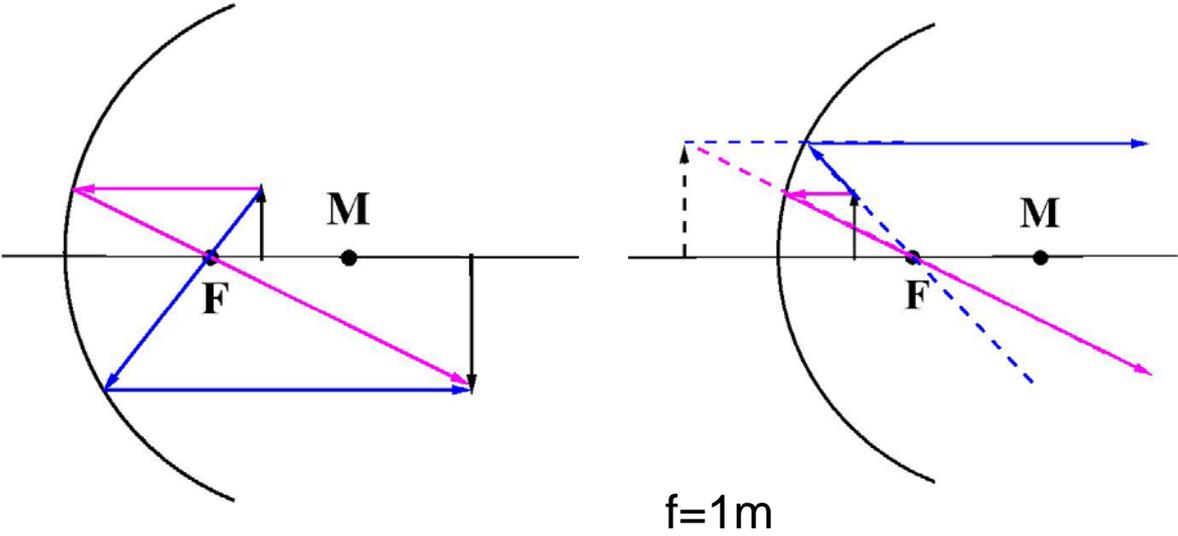
$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} \approx \frac{2}{R} \approx \frac{1}{f}$$

$$b = \frac{g \cdot f}{g - f} \quad ; \quad g = \frac{b \cdot f}{b - f} \quad ; \quad f = \frac{g \cdot b}{g + b}$$

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

Hohlspiegel:

Versuch: Abbildung Hohlspiegel

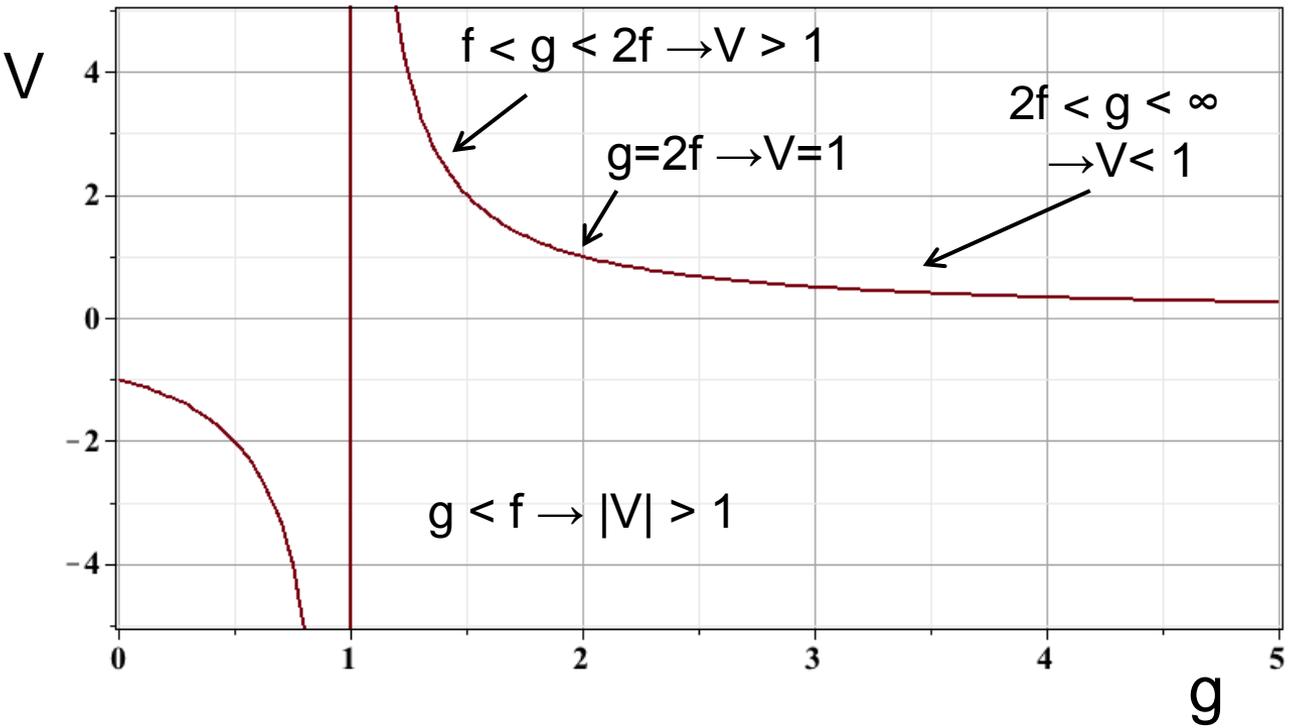


$$b = \frac{f \cdot g}{g - f}$$

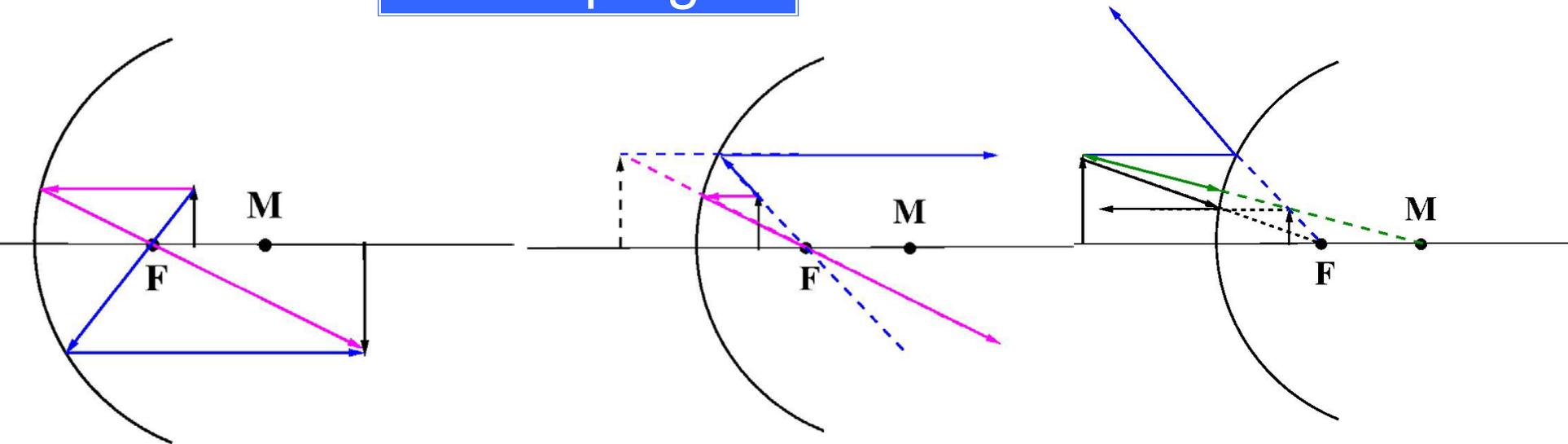
$$V = \frac{f}{g - f}$$

$g = 2f \Rightarrow V = 1$
 $g = f \Rightarrow V = \infty$
 $g < f \Rightarrow |V| > 1$

$b > 0$
 $b = \infty$
 $b < 0$



Hohlspiegel



Gegenstandsweite	Bildweite	Bild		Vergrößerung
$\infty \geq g > 2f$	$f \leq b < 2f$	umgekehrt	reell	< 1
$g = 2f$	$b = 2f$	umgekehrt	reell	$= 1$
$f < g < 2f$	$b > 2f$	umgekehrt	reell	> 1
$g = f$	$b = \infty$			
$g < f$	$b > g$	aufrecht	virtuell	> 1
beliebig	$b < f$	aufrecht	virtuell	< 1

} konkav

} konvex

Hohlspiegel. Sphärische Aberration

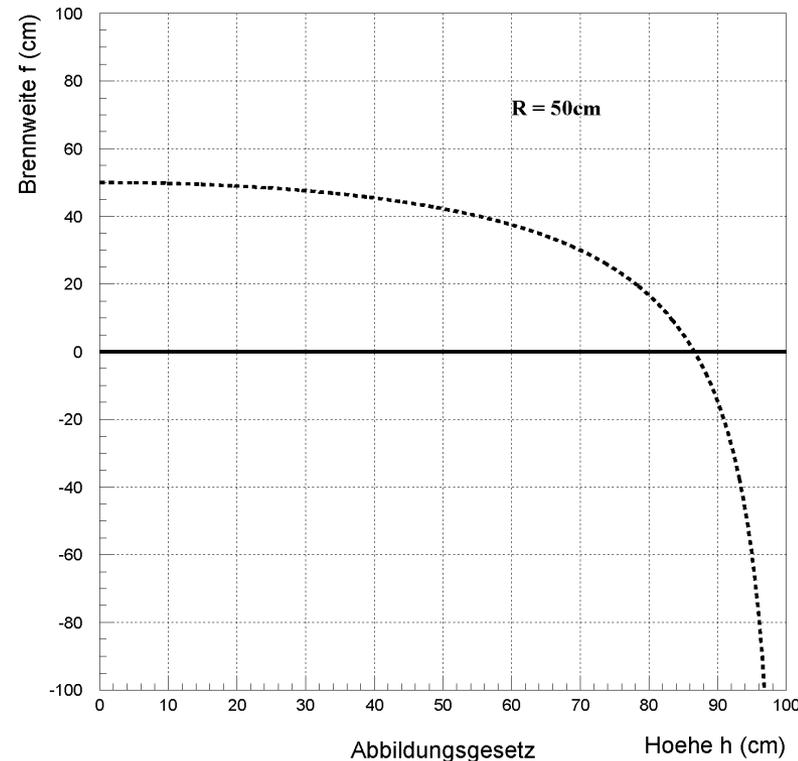
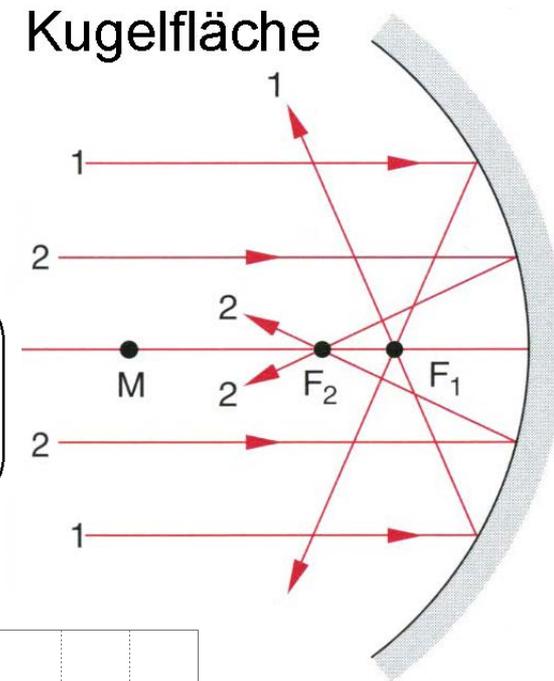
Versuch: Hohlspiegel Abbildungsfehler

Näherung $h/R \ll 1$ nicht mehr gültig für achsferne Strahlen:

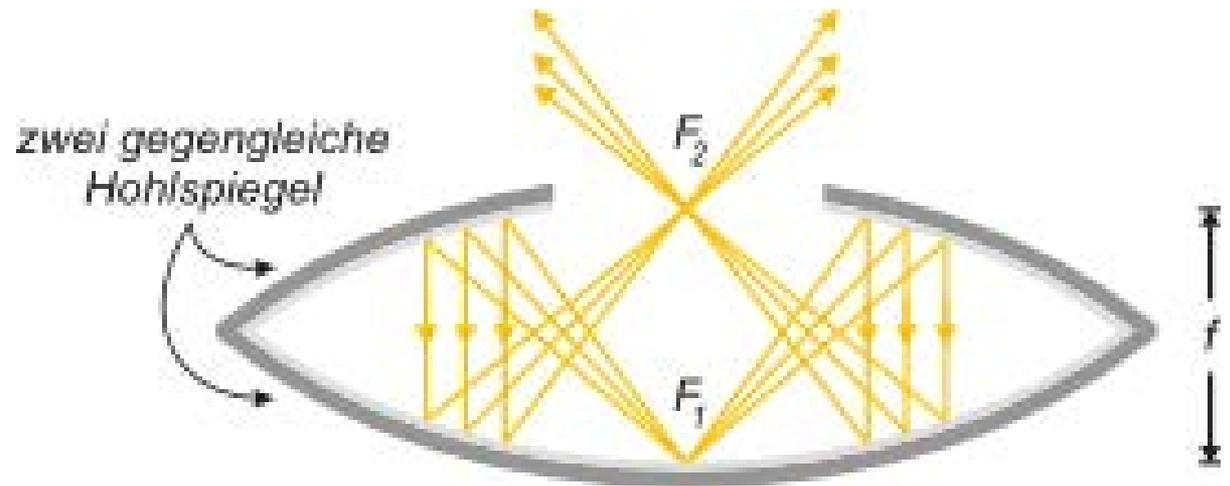
$$f = R \left(1 - \frac{1}{2 \cos \alpha} \right) = R \left(1 - \frac{1}{2 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} \right) = R \left(1 - \frac{1}{2 \sqrt{1 - (h/R)^2}} \right)$$

$$= R \left(1 - \frac{R}{2 \sqrt{R^2 - h^2}} \right) = f(h)$$

*Sphärische Aberration
(Katakaustik)*

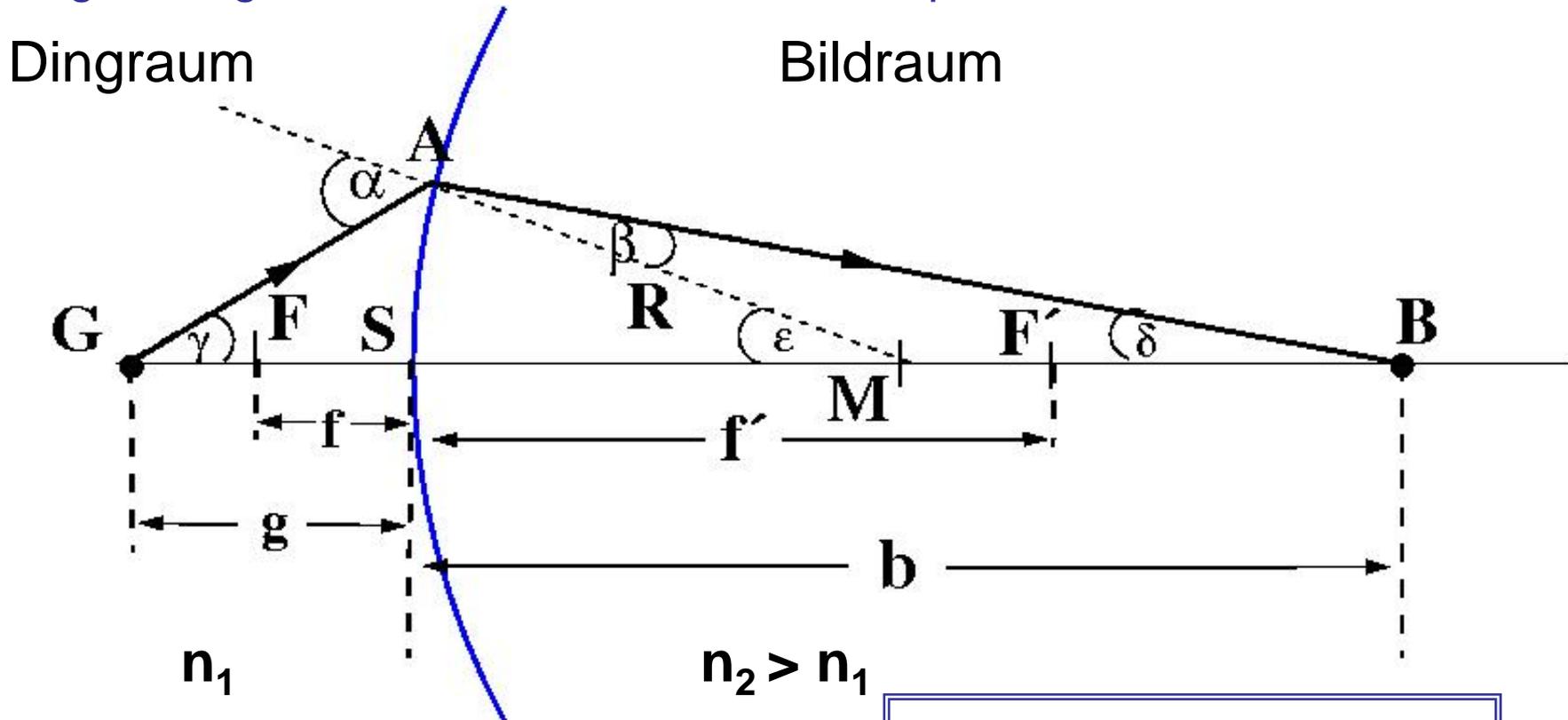


Zauberspiegel, 3d-Illusion



Linsen

Brechung an Kugelfläche mit Radius R und Mittelpunkt M:



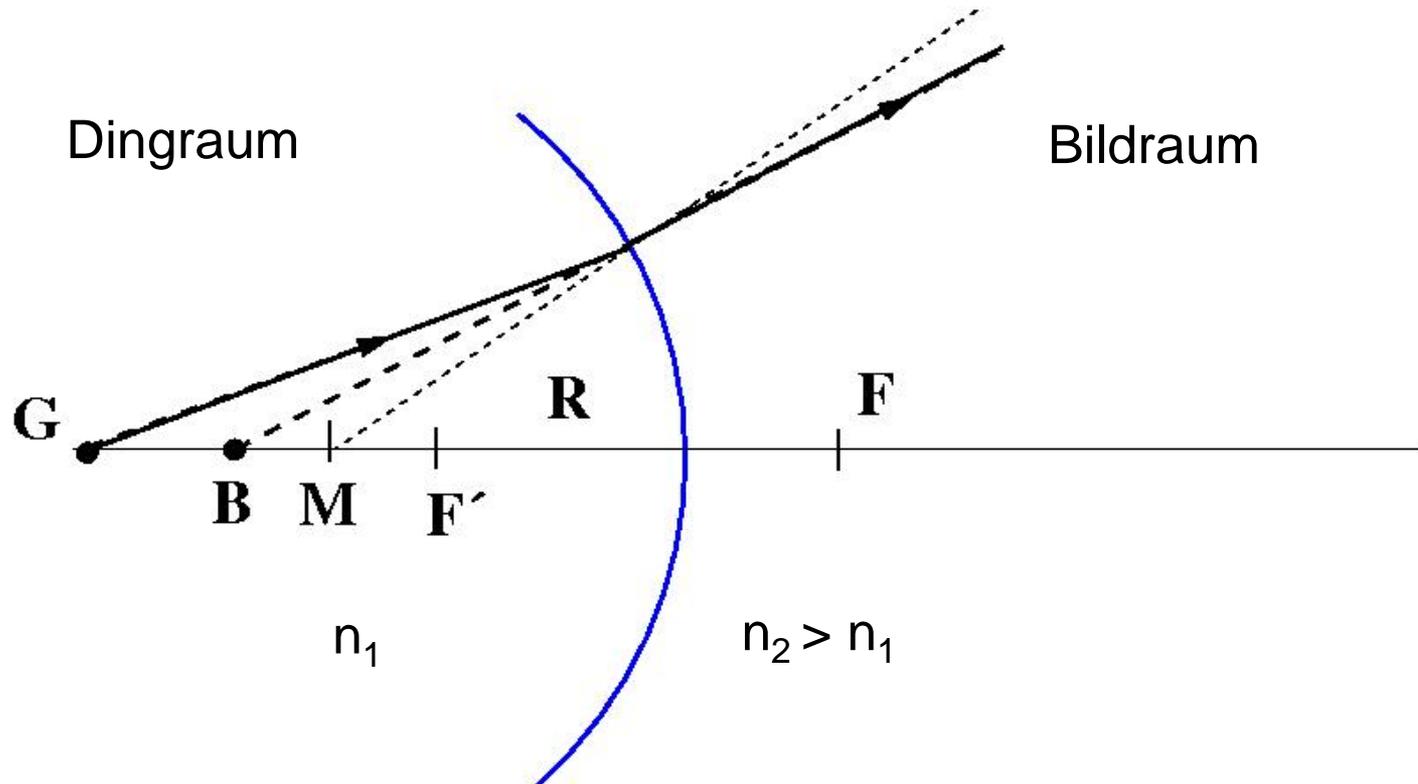
Abbildungsgleichung für konvexe Seite: →

$$(n_2 - n_1) \cdot \frac{1}{R} = \frac{n_1}{g} + \frac{n_2}{b}$$

Abbildungsmaßstab:

$$V = \frac{n_1 \cdot b}{n_2 \cdot g}$$

Linsen

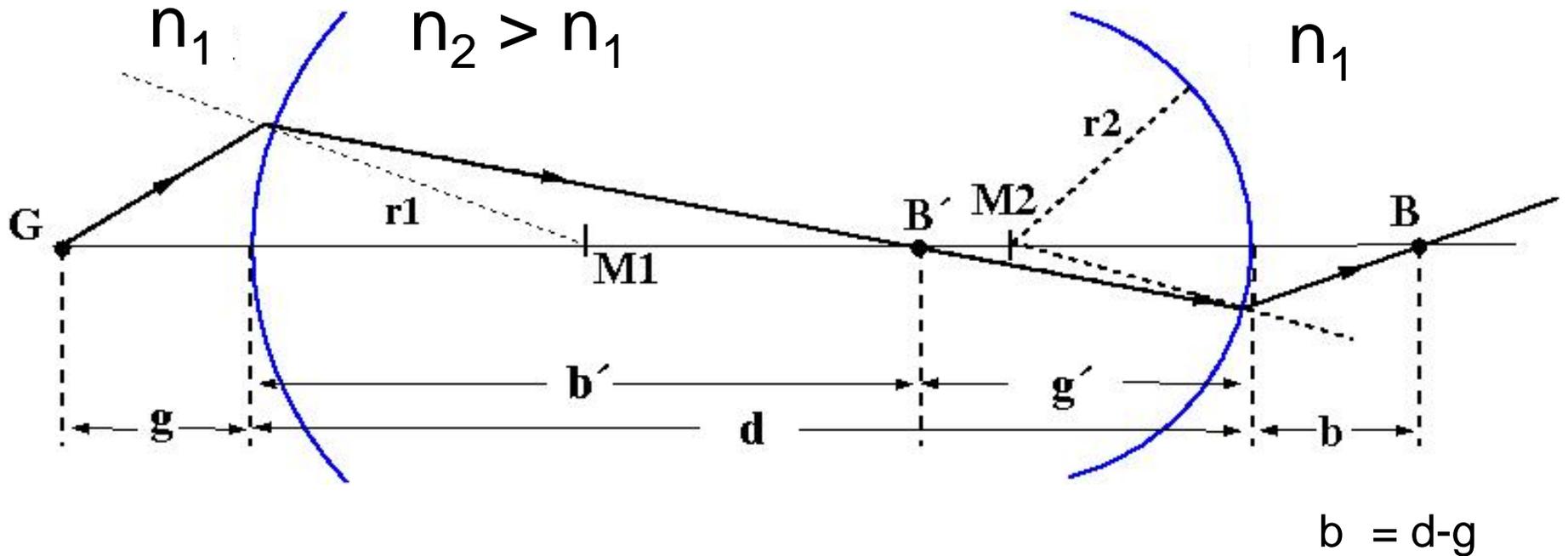


Fundamentale Abbildungsgleichung für konkave Seite:

$$-(n_2 - n_1) \cdot \frac{1}{R} = \frac{n_1}{g} + \frac{n_2}{b}$$

Sammellinsen

Abbildungsgleichung für dünne bikonvexe Sammellinsen:



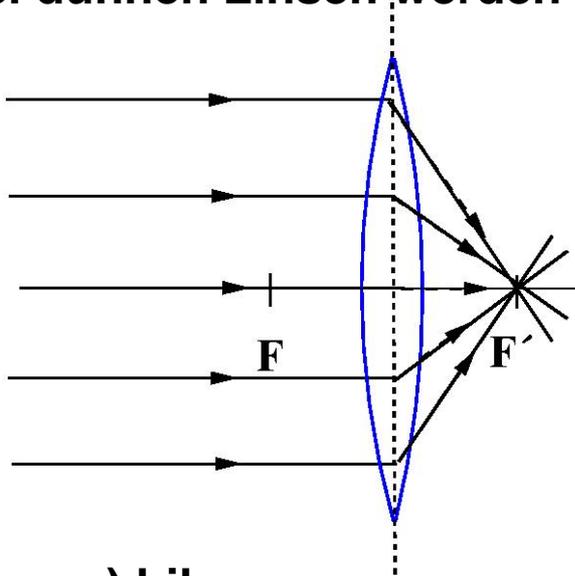
Abbildungsgleichung für dünne bikonvexe Sammellinsen
(Linsenschleiferformel):

$$\frac{n_1}{f} = n_1 \left(\frac{1}{g} + \frac{1}{b} \right) = (n_2 - n_1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

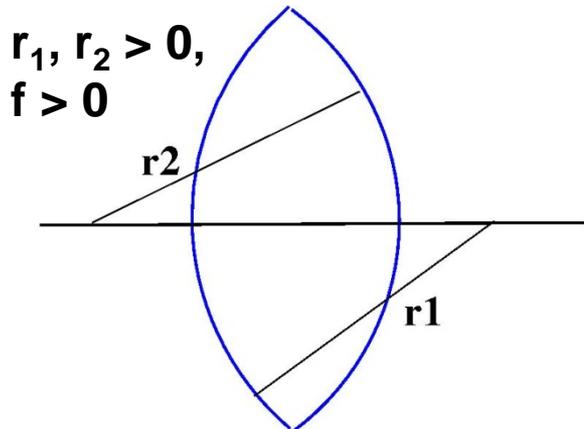
Sammellinsen

Versuch: Sammellinse Haftoptik, Strahl aus unendlichem

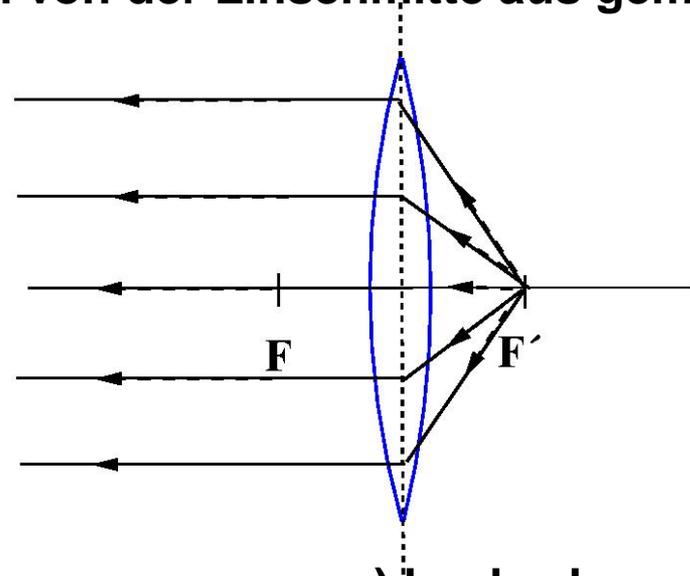
Bei dünnen Linsen werden alle Strecken von der Linsenmitte aus gemessen



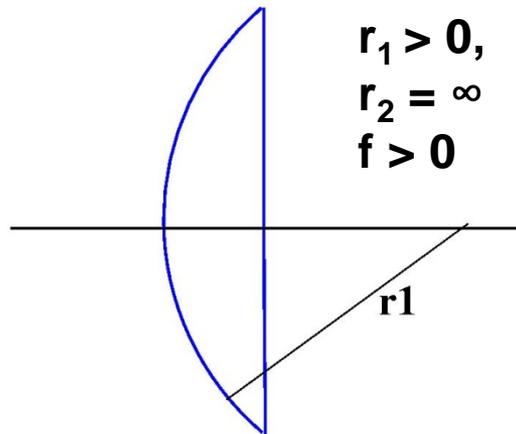
a) bikonvex



$$r_1, r_2 > 0, \\ f > 0$$

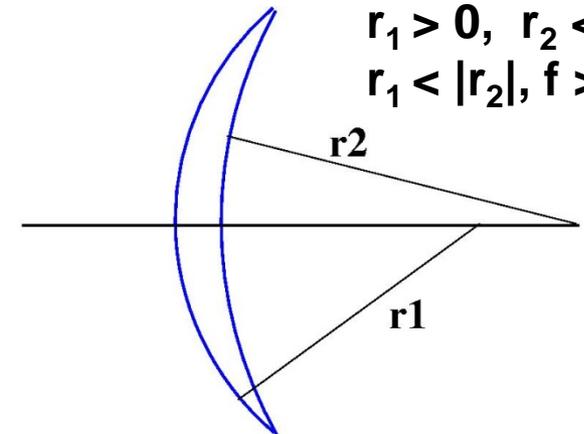


b) plankonvex,



$$r_1 > 0, \\ r_2 = \infty \\ f > 0$$

c) konkavkonvex

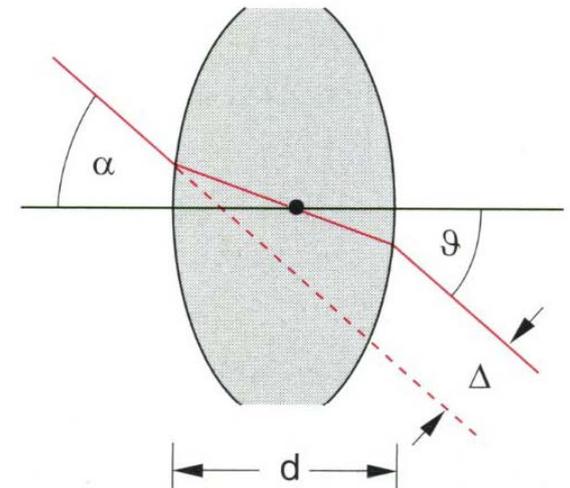
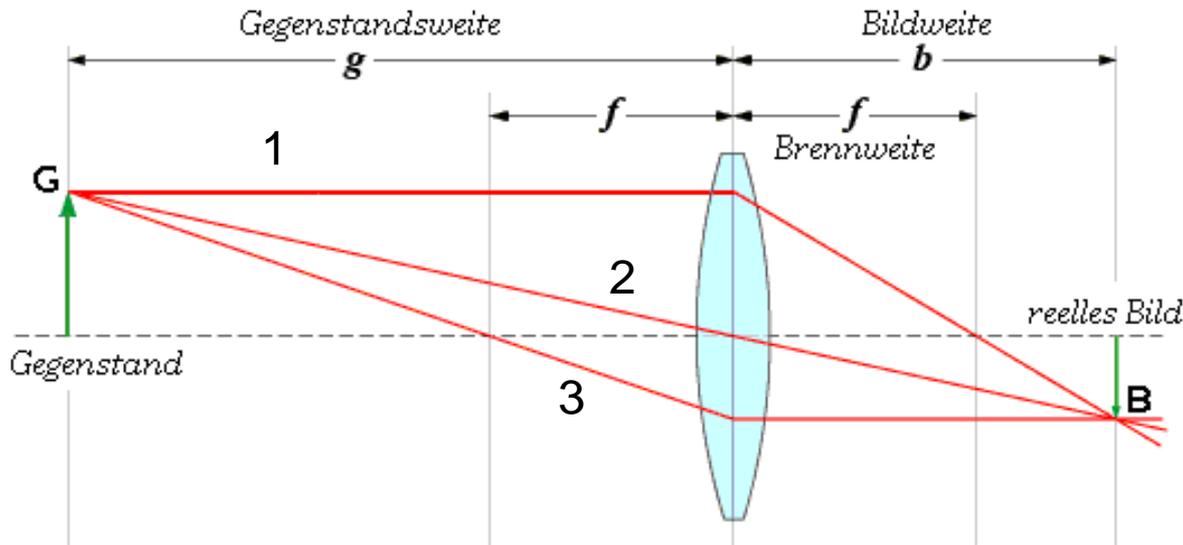


$$r_1 > 0, r_2 < 0 \\ r_1 < |r_2|, f > 0$$

Bildkonstruktion bei Sammellinsen

Verwendung von drei ausgezeichnete Strahlen:

- 1: vom Gegenstandspunkt achsenparallel einfallender Strahl geht bei Sammellinsen im Bildraum durch den Brennpunkt F ,
- 2: der Strahl, der auf die Mitte der Linse trifft, erleidet nur eine geringe Parallelverschiebung, die bei dünnen Linsen vernachlässigt wird,
- 3: der durch den Brennpunkt einfallende Brennpunktstrahl verläuft hinter der Linse achsenparallel.

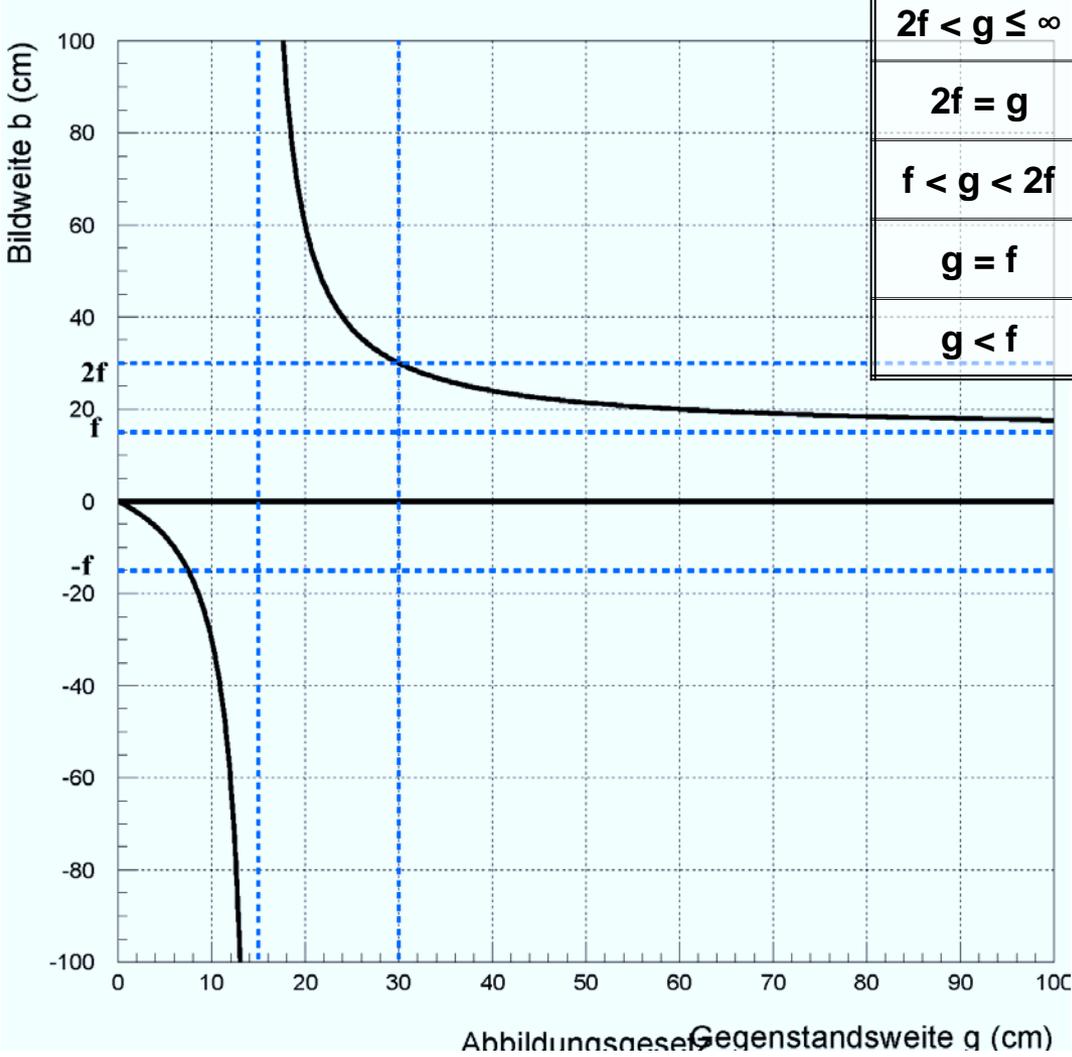


Versuch: Versatz an Linse

Abbildung mit dünnen Sammellinsen

Versuch: Sammellinse Abbildungsgesetz

g	b	B		V
$2f < g \leq \infty$	$f \leq b < 2f$	umgekehrt	reell	$0 < V < 1$
$2f = g$	$2f = b$	umgekehrt	reell	=1
$f < g < 2f$	$b > 2f$	umgekehrt	reell	$1 < V < \infty$
$g = f$	$b = \infty$			
$g < f$	$b > g$	aufrecht	virtuell	$-\infty < V < -1$



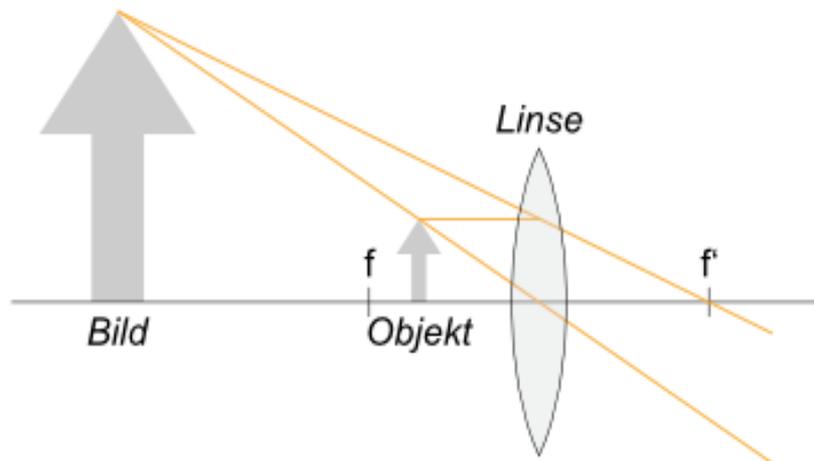
$$b = \frac{g \cdot f}{g - f} \quad ; \quad g = \frac{b \cdot f}{b - f} \quad ; \quad f = \frac{g \cdot b}{g + b}$$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$V = \frac{b}{g}$$

Versuch: Linse im Wasser

Virtuelles Bild: Lupe



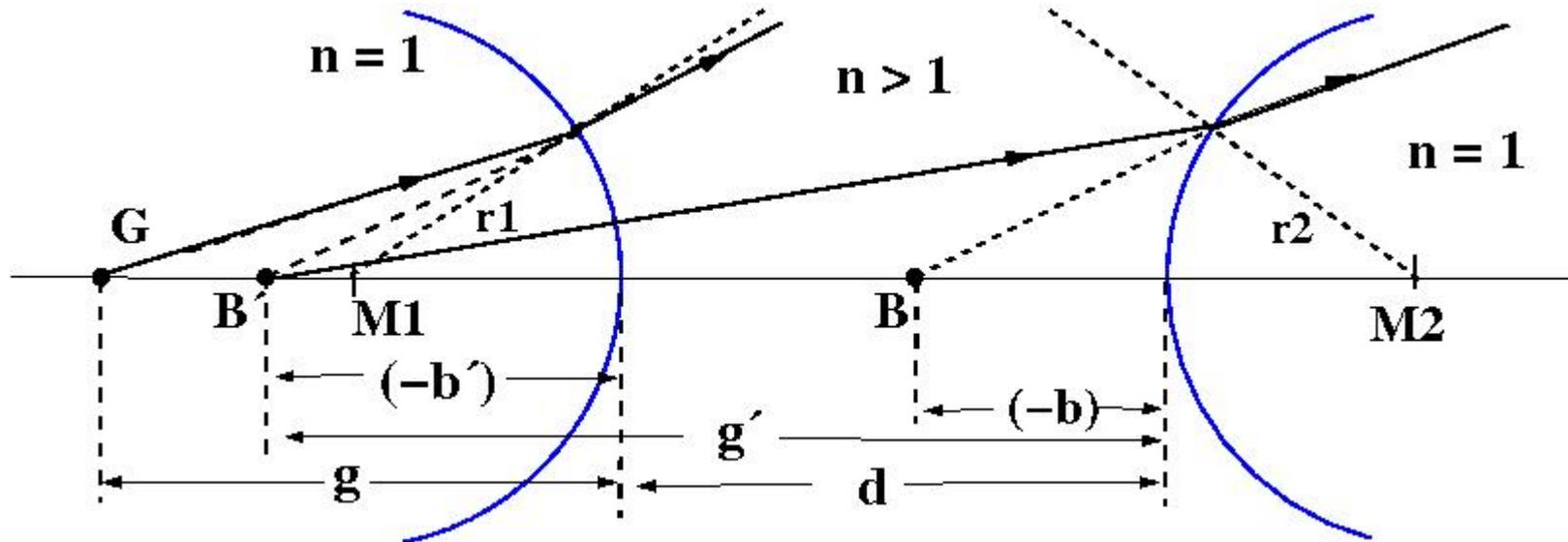
$$b = \frac{f \cdot g}{g - f} \quad V = \frac{f}{g - f}$$

$$g < f \Rightarrow |V| > 1 \quad b < 0$$



Zerstreuungslinsen

Abbildung durch dünne bikonkave Linsen (analog zu bikonvexen Linsen):



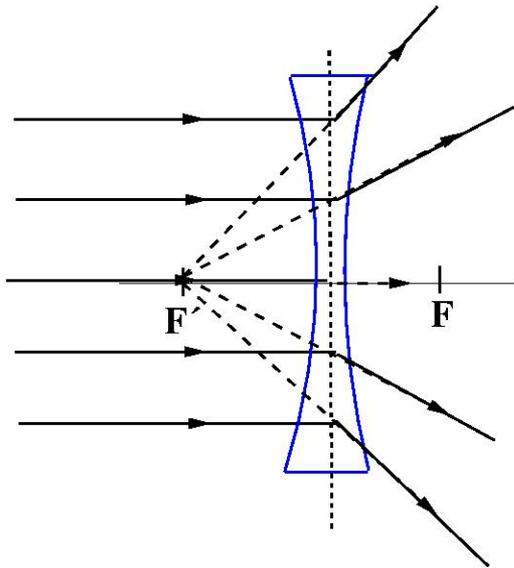
Erste Kugelfläche erzeugt virtuellen Bildpunkt B in (negativer) Bildweite b' , die zweite Kugelfläche bildet B in den virtuellen Bildpunkt B ab (negative Bildweite b). Durch den Übergang $d \rightarrow 0$ folgt Abbildungsgleichung für eine dünne bikonkave Zerstreuungslinse:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = -(n - 1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

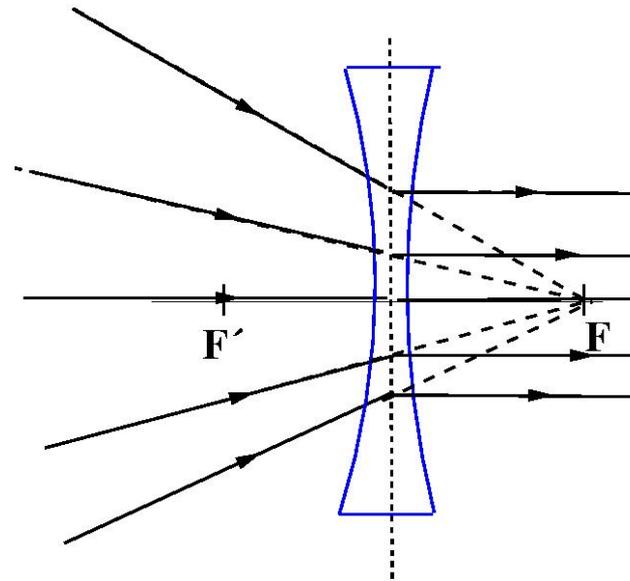
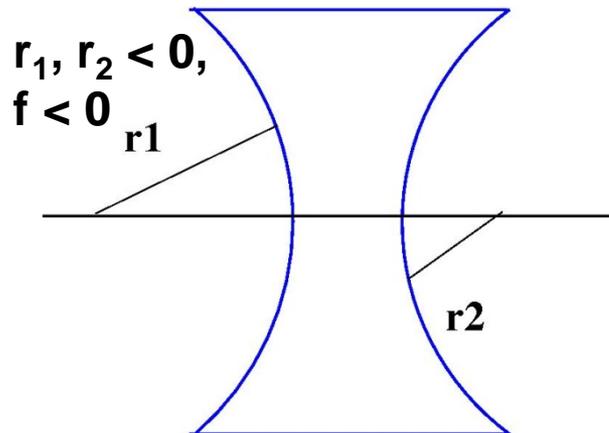
Brennweiten von Zerstreuungslinsen sind negativ

Zerstreuungslinsen

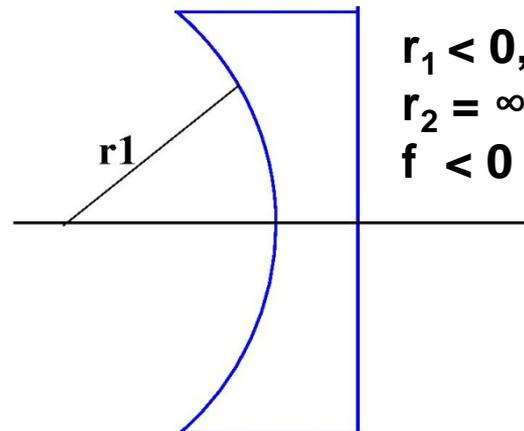
Versuch: Zerstreuungslinse Haftoptik, Strahl aus unendlichem



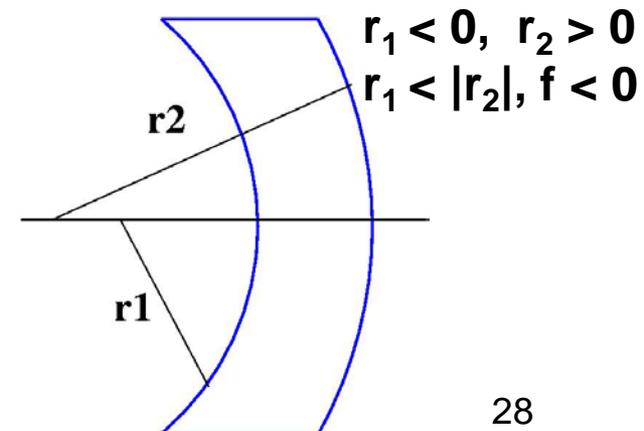
a) bikonkav



b) plankonkav,



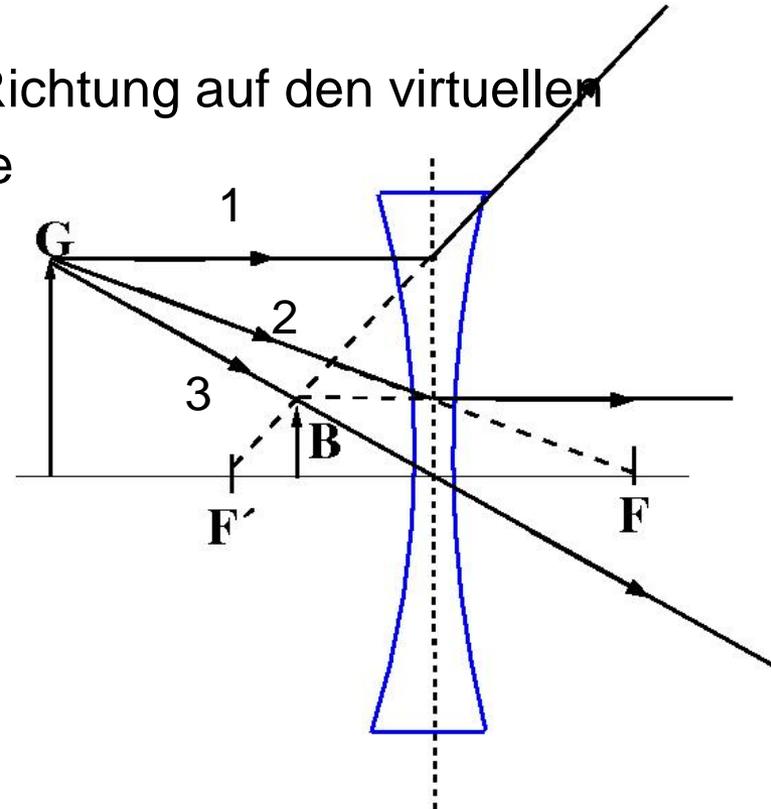
c) konvexkonkav



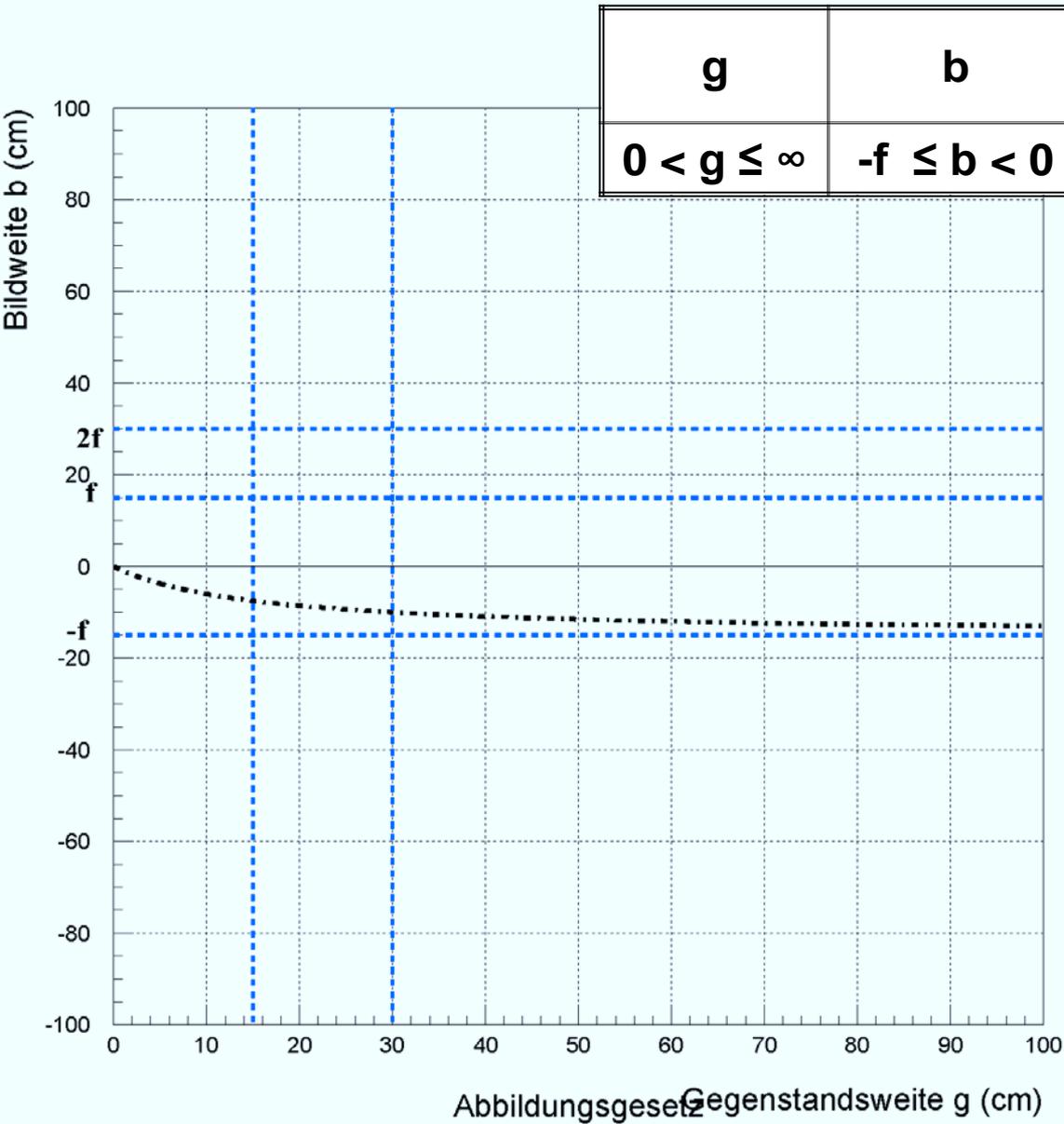
Bildkonstruktion bei Zerstreuungslinsen

Verwendung von drei ausgezeichnete Strahlen:

- 1: vom Gegenstandspunkt achsenparallel einfallender Strahl verläuft bei Zerstreuungslinsen im Bildraum so, als wenn er vom virtuellen Brennpunkt F im Dingraum ausgeht,
- 2: der Strahl, der bei Zerstreuungslinsen die Richtung auf den virtuellen Brennpunkt F hat, verläuft hinter der Linse einfallende achsenparallel,
- 3: der Strahl, der auf die Mitte der Linse trifft, erleidet nur eine geringe Parallelverschiebung, die bei dünnen Linsen vernachlässigt wird.



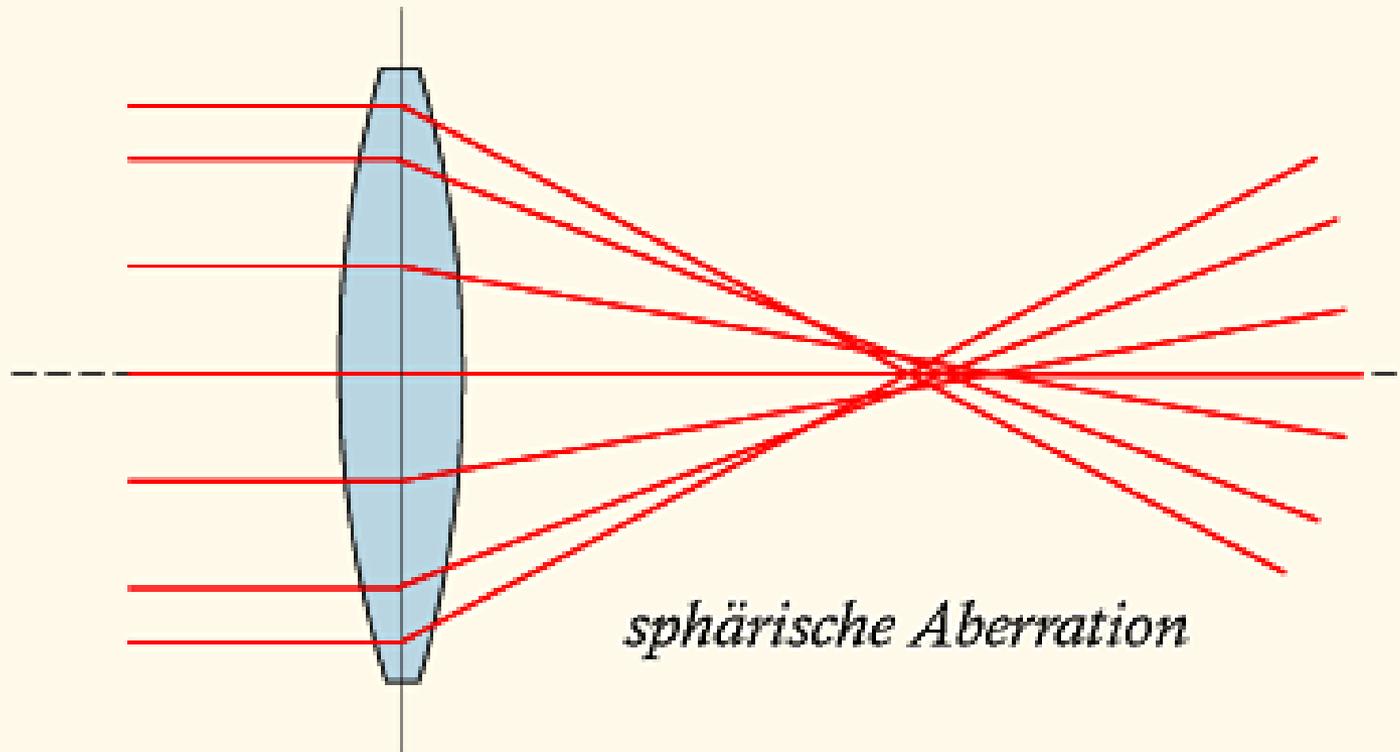
Bildkonstruktion bei Zerstreuungslinsen



Abbildungsfehler: Monochromatische

Sphärische Aberration: achsenferne Strahlen werden stärker gebrochen,
→ kürzere Brennweite, als achsnahe Strahlen

Versuch: sphärische Aberration Sammellinse Haftoptik

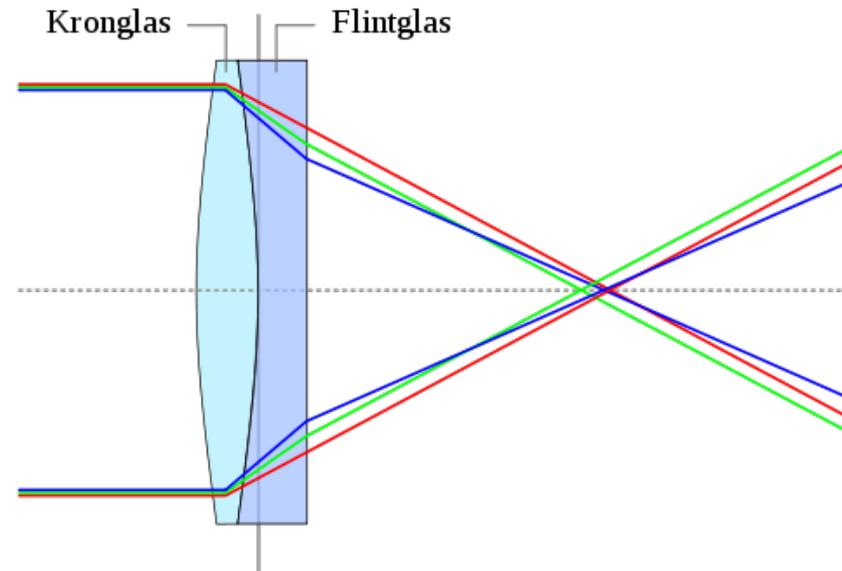
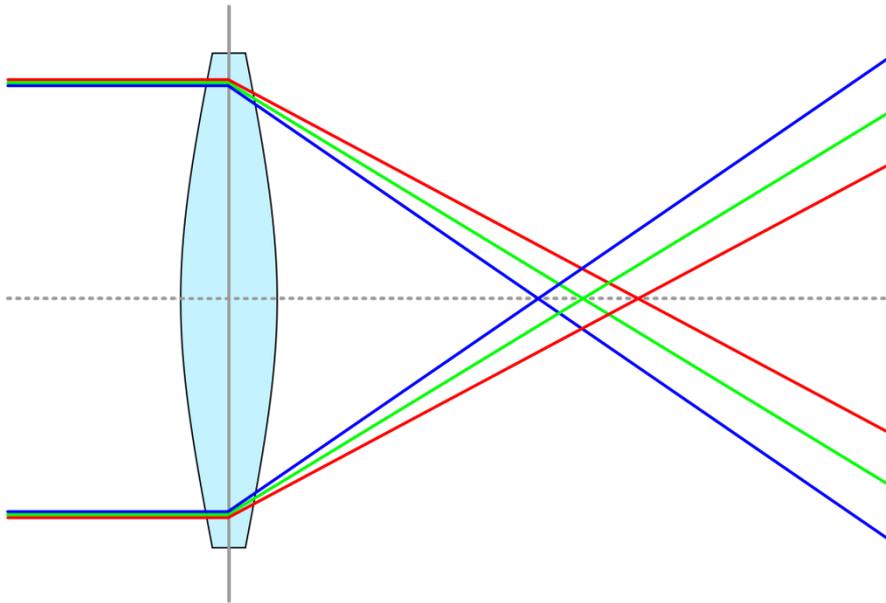


Abbildungsfehler: Farbfehler

Chromatische Aberration: Brennweiten abhängig vom wellenlängenabhängigen Brechungsindex $n(\lambda)$ (Dispersion) des Linsenmaterials;

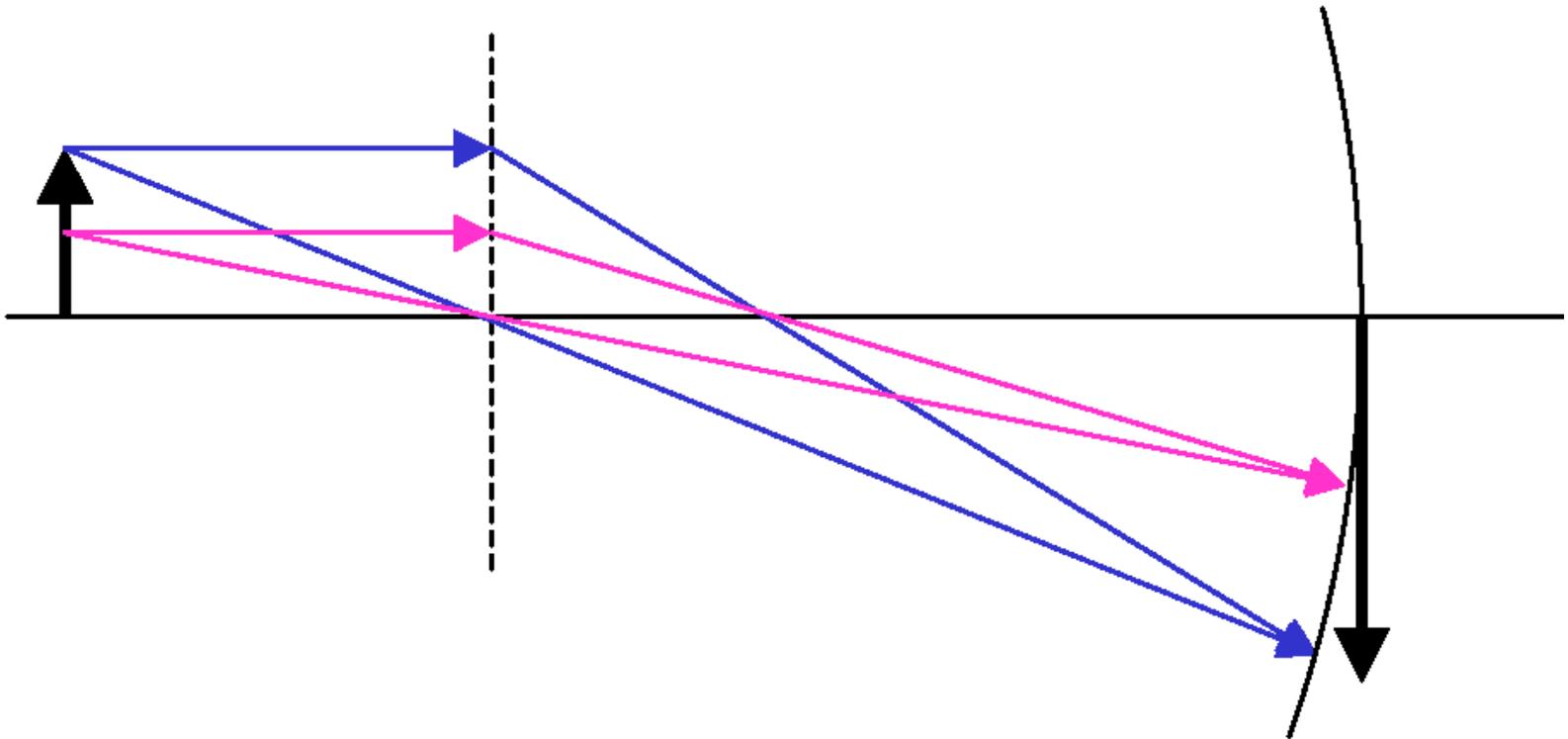
$$f(\lambda) = \frac{1}{n(\lambda) - 1} \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

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



Monochromatische Abbildungsfehler

Bildfeldwölbung: Eine Gegenstandsebene wird nicht auf eine Bildebene abgebildet, sondern, wegen der stärkeren Brechung achsenferner Strahlen, in eine gewölbte Fläche



Monochromatische Abbildungsfehler

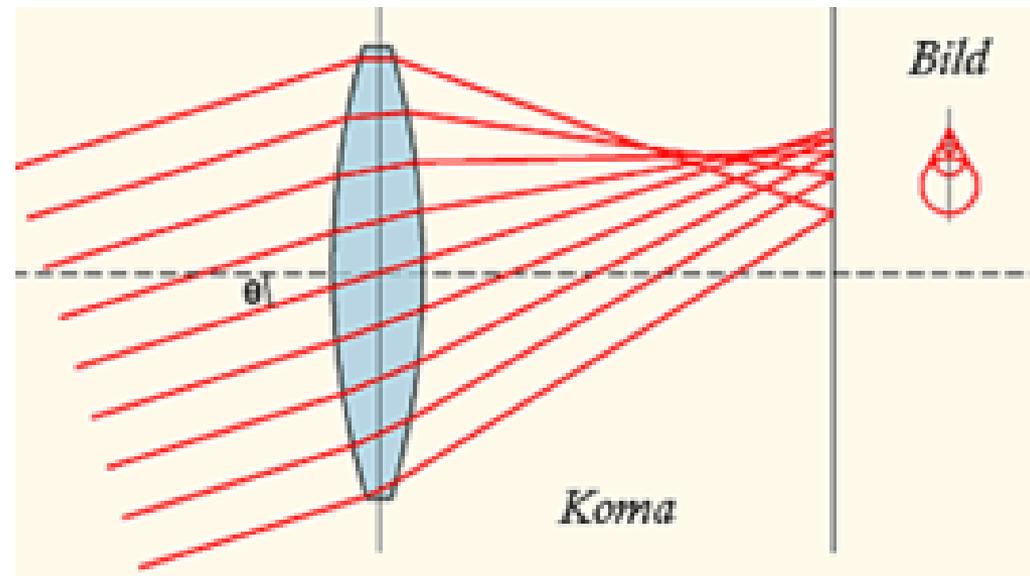
Koma: schräg zur optischen Achse einfallende Strahlen

→ Überlagerung zweier Abbildungsfehler:

1.) achsparallelem Bündel: **sphärischen Aberration**

2.) **Astigmatismus** schiefer Bündel.

Anstelle eines scharfen Beugungs-
scheibchens entsteht Bildpunkt mit
zum Rand der Optik gerichtetem
„Schweif“.

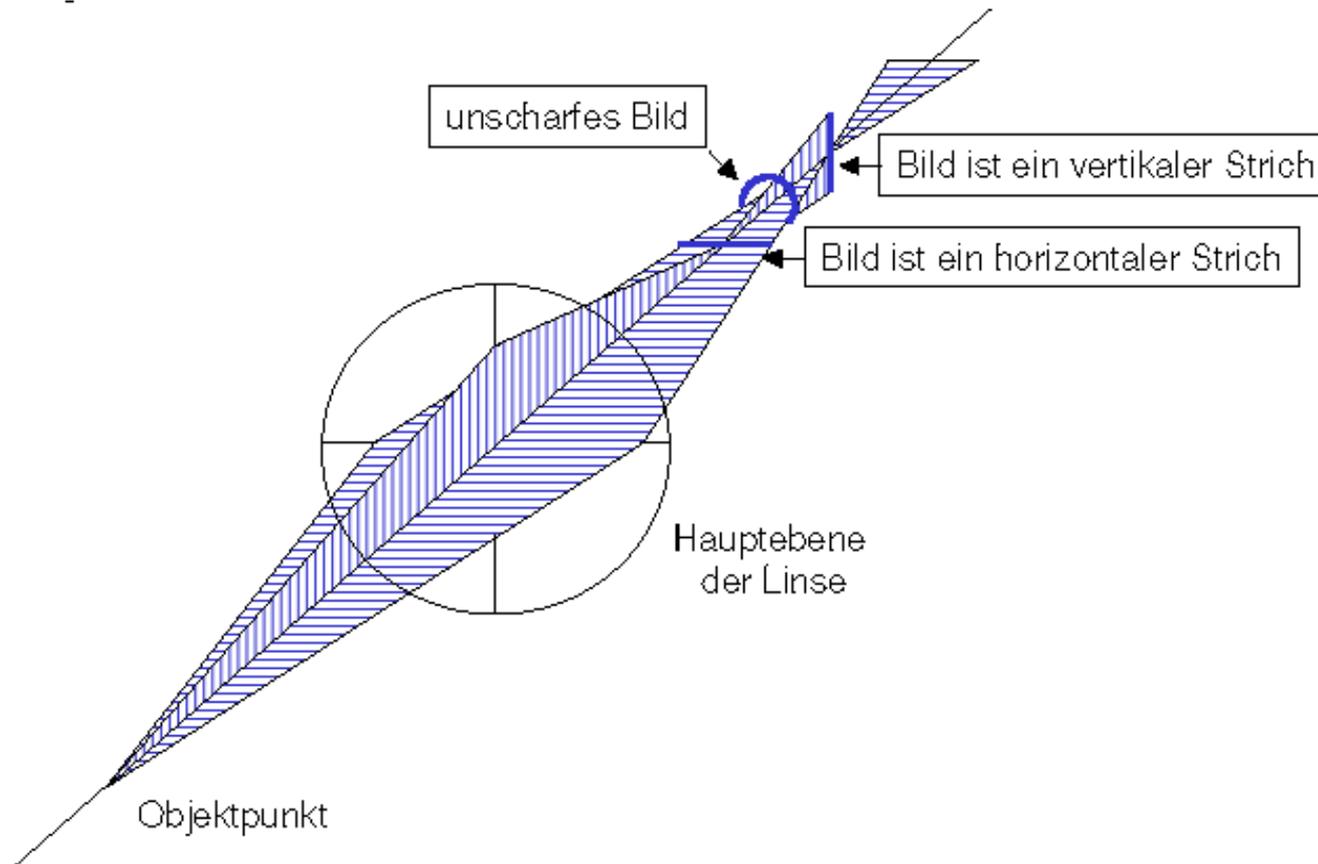


Minderung durch Abblenden der Randstrahlen,

Astigmatismus schiefer Bündel bleibt aber bestehen.

Monochromatische Abbildungsfehler

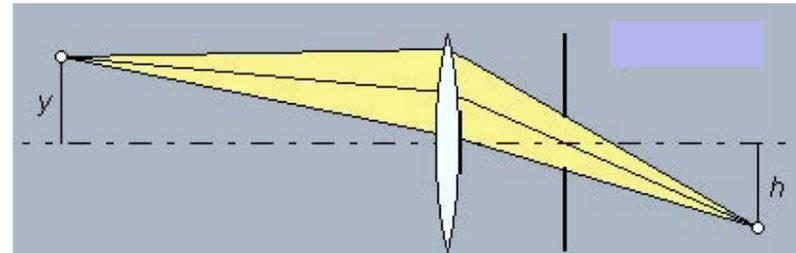
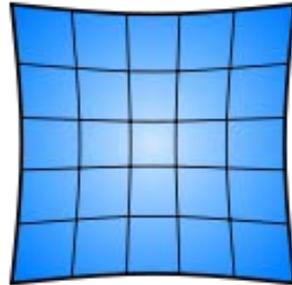
Astigmatismus: Die Brennweite einer schrägstehenden Linse ist für verschiedene Strahlenwege unterschiedlich. Das Bild eines Punktes wird zum Strich, Kreis oder Ellipse aufgeweitet.



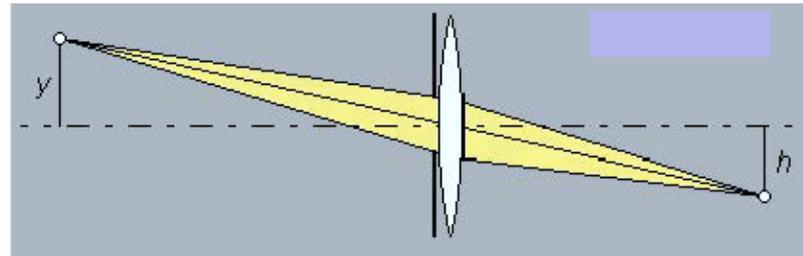
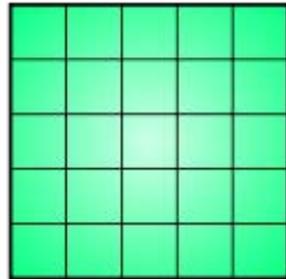
Monochromatische Abbildungsfehler

Verzeichnung: beeinträchtigt nicht Schärfe des Bildes, sondern Verzerrung des Bildes dadurch, dass der Abbildungsmaßstab V für achsen-ferne Bereiche anders ist als für achsennahe ($V_{\text{fern}} > V_{\text{nah}}$ kissenförmig, $V_{\text{fern}} < V_{\text{nah}}$ tonnenförmig). Tritt besonders dann auf, wenn Blenden benutzt werden.

kissenförmige
Verzeichnung



Verzeichnungsfreie
Abbildung



tonnenförmige
Verzeichnung

