

Physik für Maschinenbau

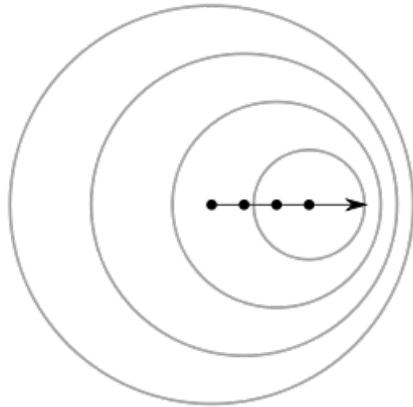
Dr. Thomas Kirn



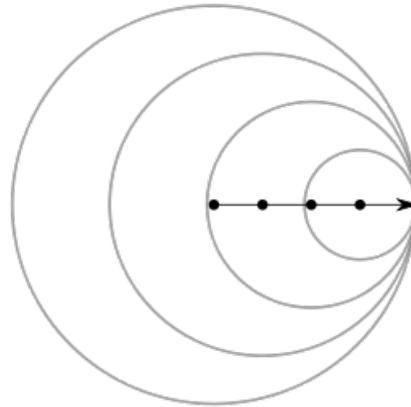
Vorlesung 12

Wiederholung V11

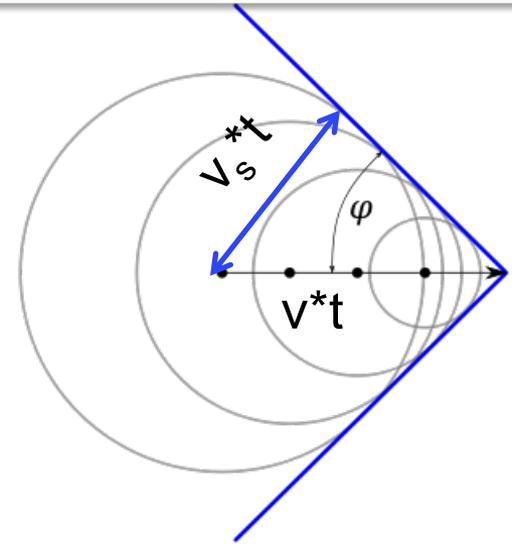
Mach-Kegel



$$v < v_s$$



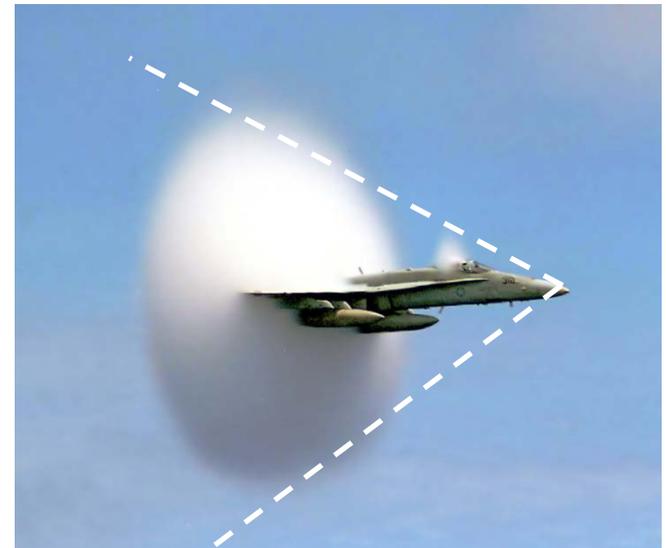
$$v = v_s$$



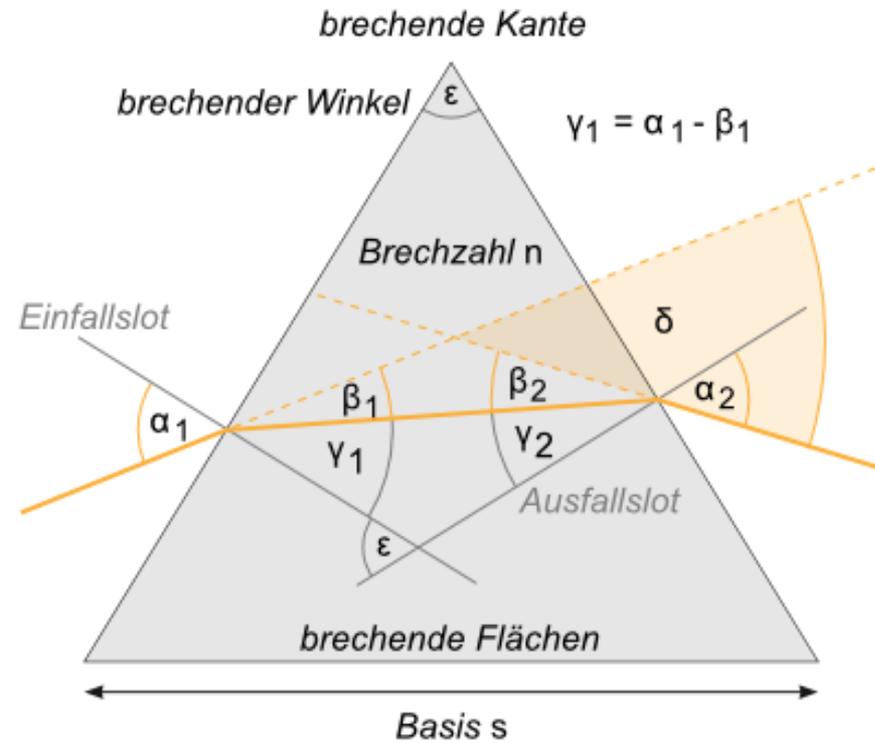
$$v > v_s$$

$$\sin \varphi = \frac{s_{\text{Welle}}}{s_{\text{Objekt}}} = \frac{v_s t}{v t} = \frac{v_s}{v} = \frac{1}{Ma}$$

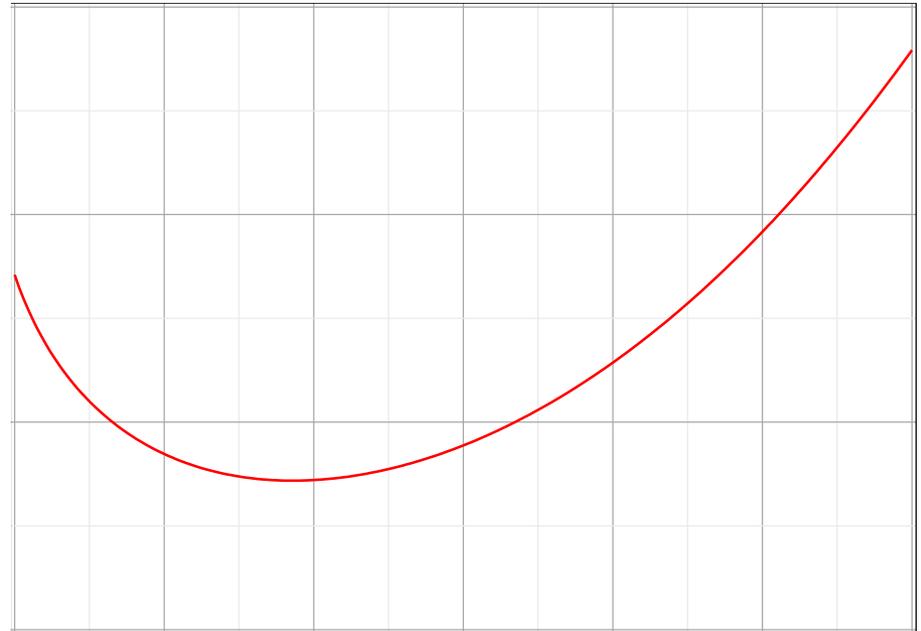
$$Ma \equiv \frac{v}{v_s}$$



Prisma - Minimalablenkung



$$\delta = \alpha_1 + \arcsin \left[\sin \varepsilon \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1} - \sin \alpha_1 \cos \varepsilon \right] - \varepsilon$$



$$n = \frac{\sin \left(\frac{\delta_{\min} + \varepsilon}{2} \right)}{\sin \frac{\varepsilon}{2}}$$

Prisma - Dispersion

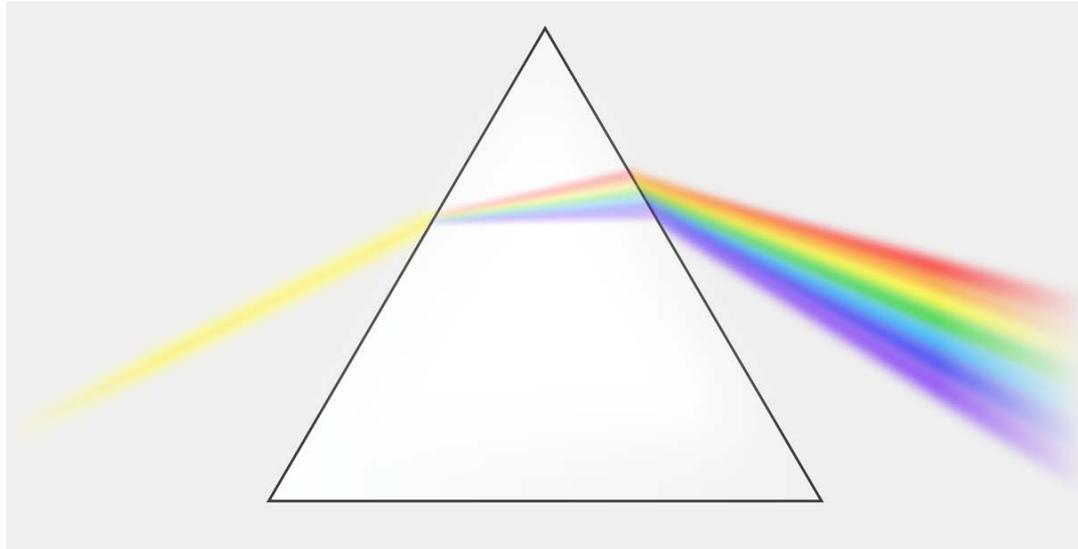
$$n = \frac{\sin\left(\frac{\delta_{\min} + \varepsilon}{2}\right)}{\sin\frac{\varepsilon}{2}}$$

$$\Leftrightarrow \delta_{\min} = 2 \cdot \arcsin\left[n(\lambda) \cdot \sin\frac{\varepsilon}{2}\right] - \varepsilon$$

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

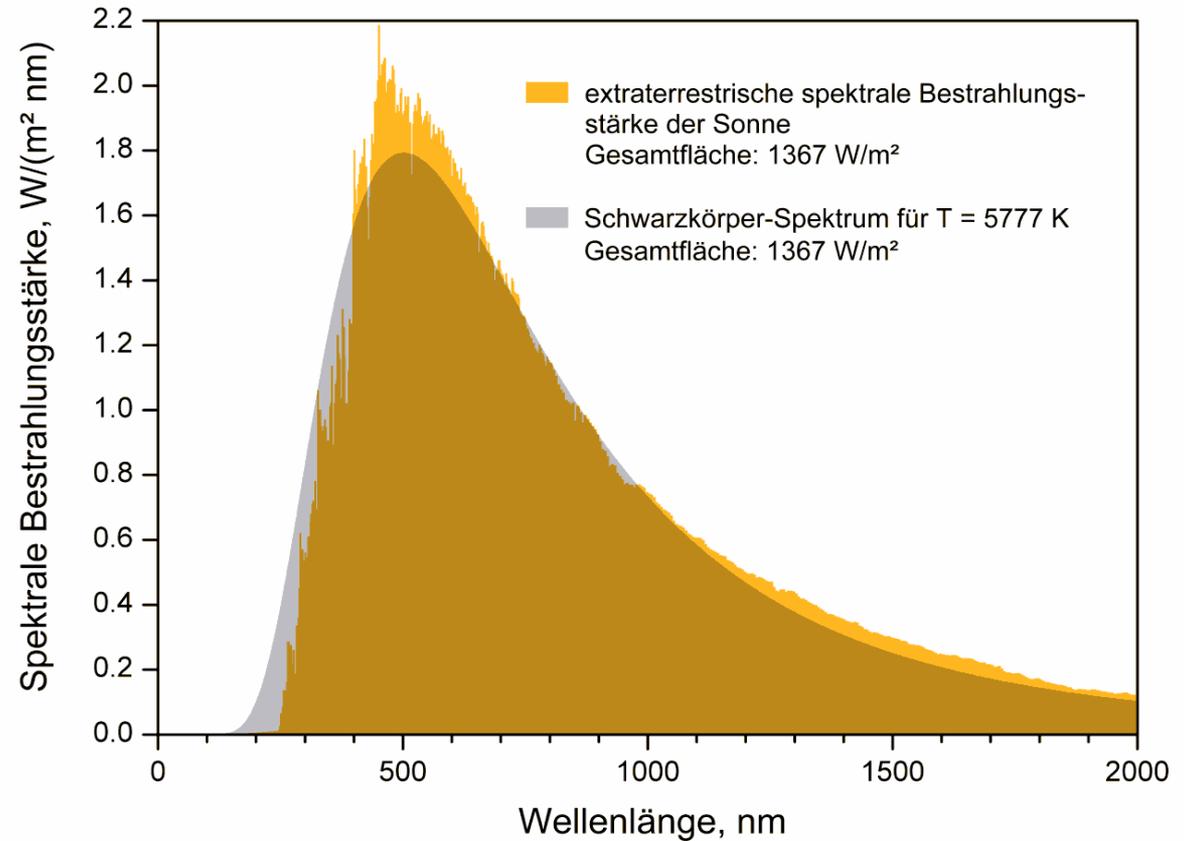
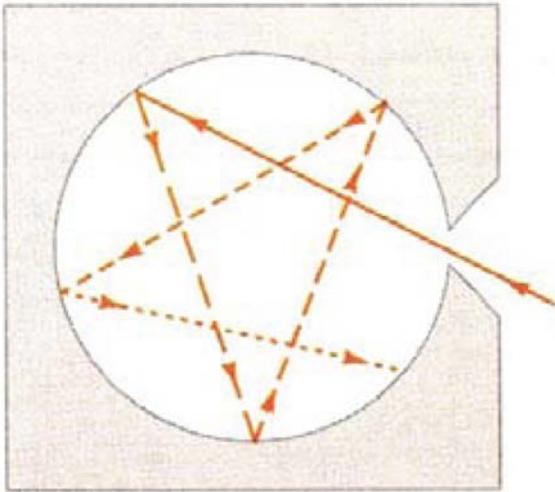
$$\Rightarrow \delta_{\min}(\lambda) = 2 \cdot \arcsin\left[\left(A + \frac{B}{\lambda^2}\right) \cdot \sin\frac{\varepsilon}{2}\right] - \varepsilon$$

Für $\varepsilon = 60^\circ$ und Borsilikatglas, d.h. $A = 1.5046$
und $B = 0.00420 \mu\text{m}^2$ ergibt sich:

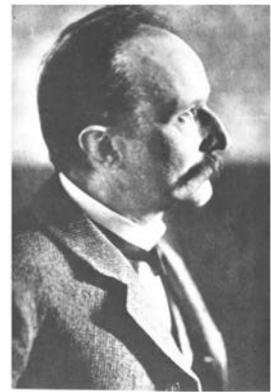


Lichterzeugung, Lichtquellen: Wärmestrahlung

Schwarzer Körper:
→ Hohlraumstrahlung



Lichterzeugung: Wärmestrahlung



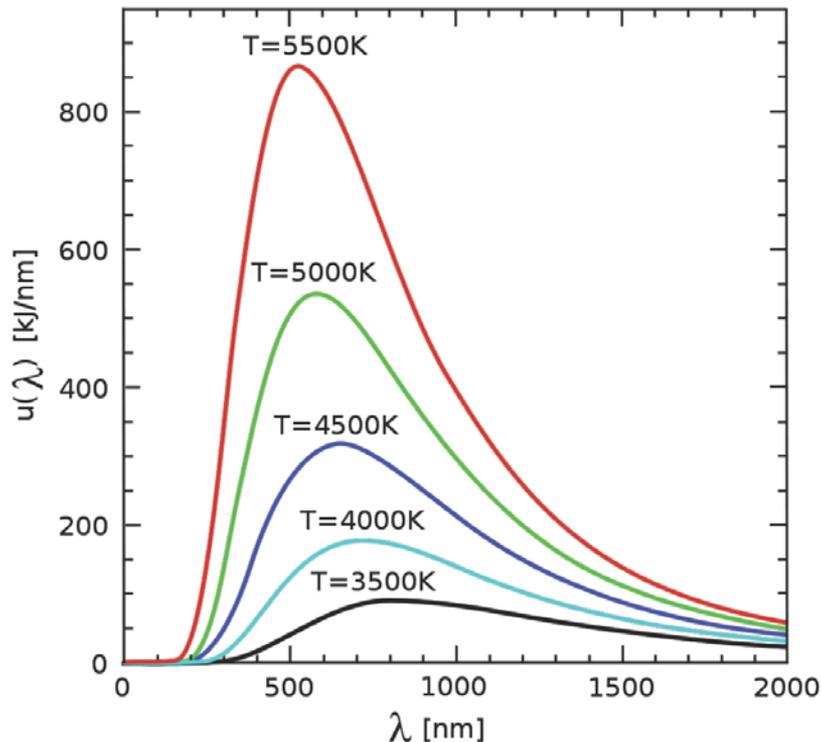
Max Planck
1858 - 1947

Planck sches Strahlungsgesetz:

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

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

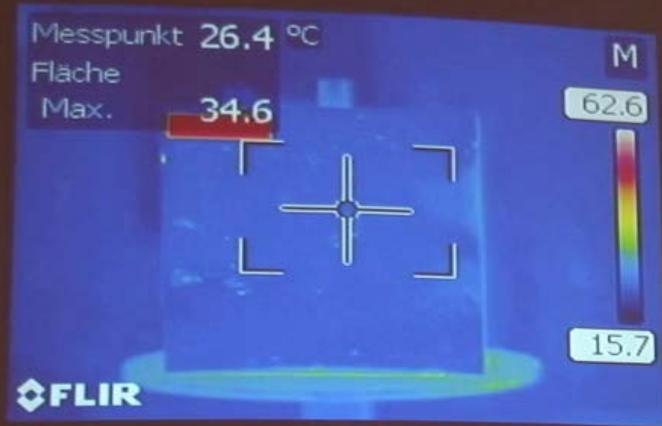
Körper schwarz $\rightarrow \varepsilon = 1$

Körper verspiegelt $\rightarrow \varepsilon = 0$

ansonsten $0 < \varepsilon < 1$

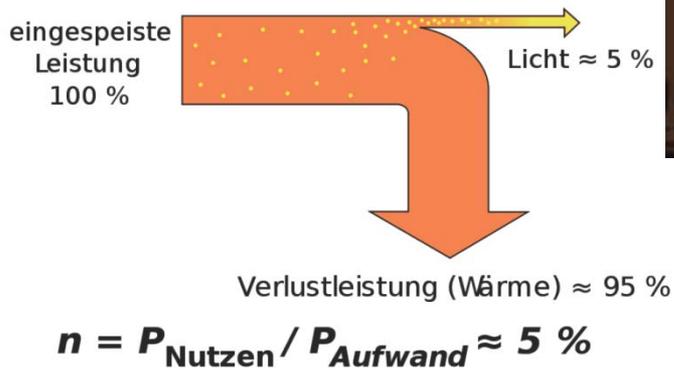
Versuch:
Leslie-Würfel, Lichtmühle

Lichterzeugung: Wärmestrahlung

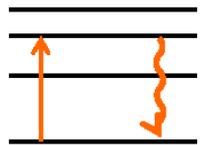
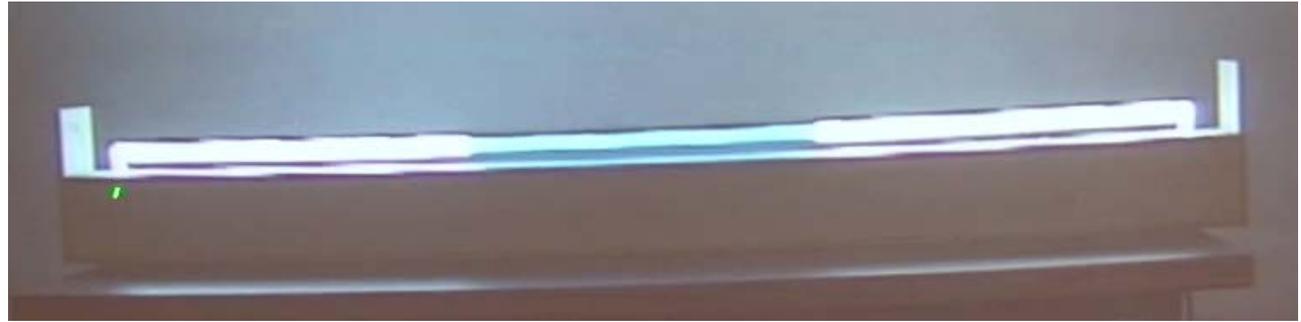
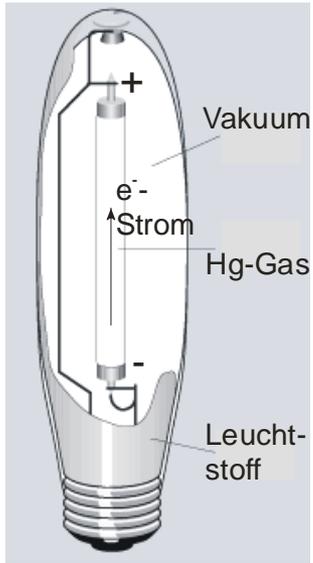


Wärmestrahlung

Glühfaden aus Wolfram ($T = 2000 - 3000 \text{ K}$),
Schutzgas (N_2/Ar - Gemisch), Lebensdauer ca. 1000h



Lichterzeugung: Spektrallampen, Beispiel Energiesparlampe



Anregung Emission



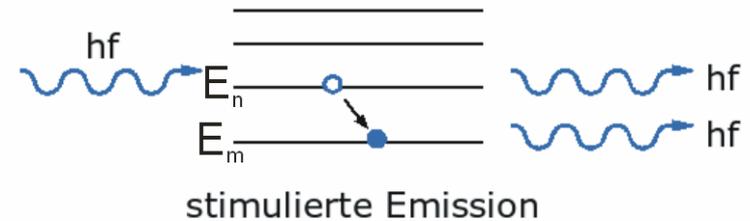
Vorlesung 12

Lichterzeugung: Laser

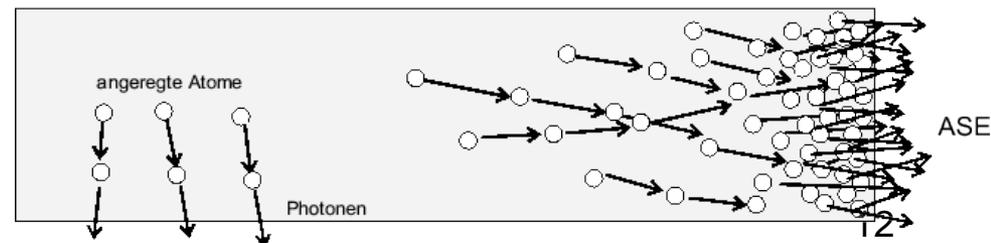
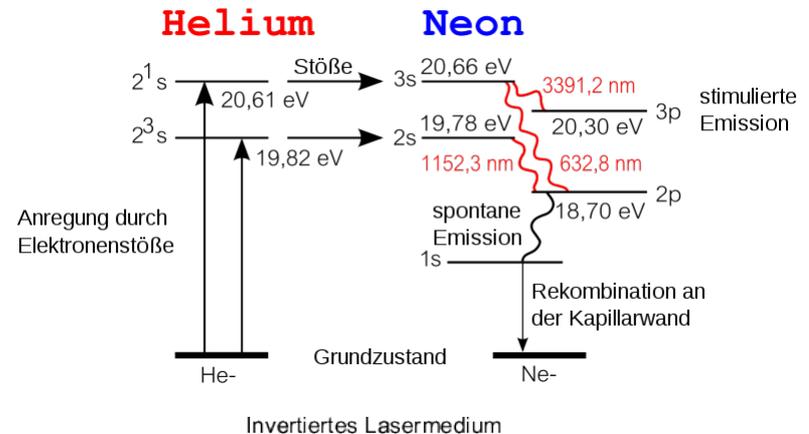
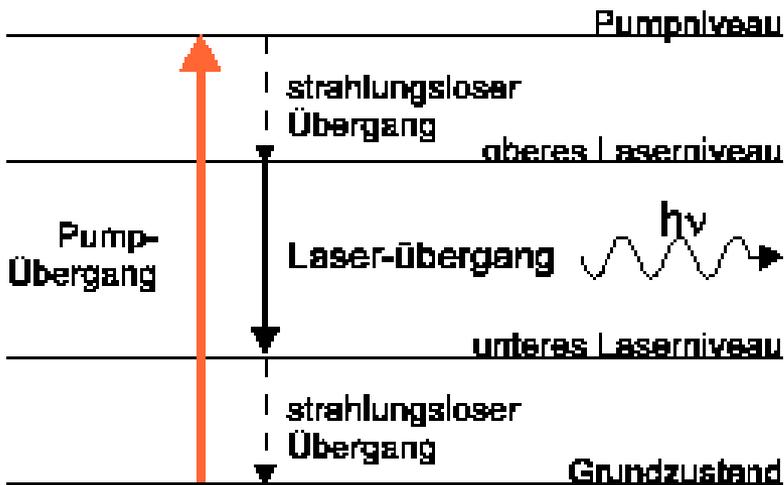
(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Erneut: Elektron kann im Atom verschiedene Energiezustände E_n und E_m ($E_n > E_m$) besetzen, Licht mit passender Frequenz $\nu = (E_m - E_n) / h$ trifft Elektron \rightarrow 2 Möglichkeiten:

1. Elektron im Zustand E_m , Absorption des Photons
2. Elektron im Zustand E_n , Emission eines Photons \rightarrow stimulierte Emission



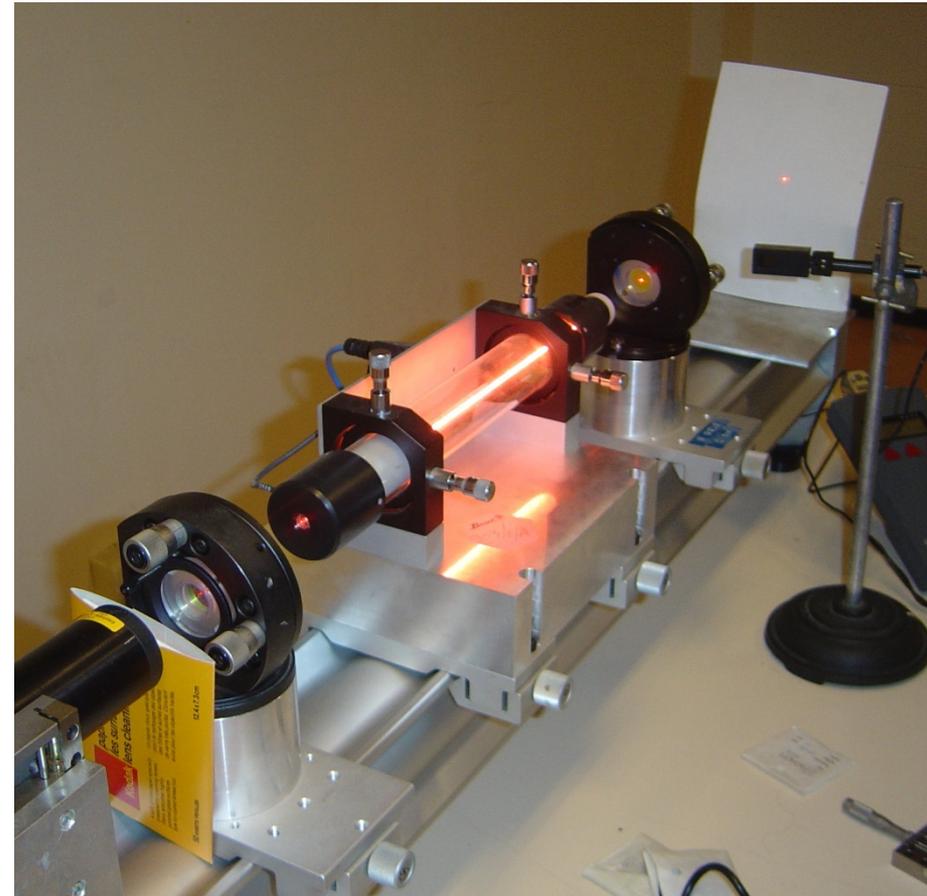
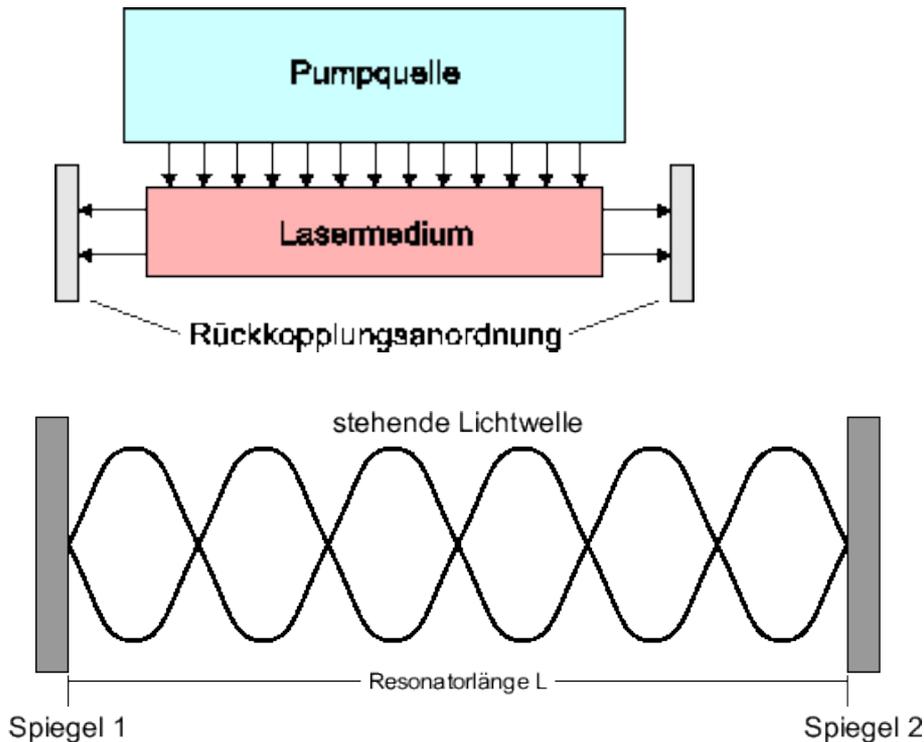
Pumpen: z.B. Stöße von He-Atomen mit Ne-Atomen \rightarrow Besetzungsinversion \rightarrow spontane Emission in alle Richtungen



Lichterzeugung: Laser

(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Pumpen: z.B. Stöße von He-Atomen mit Ne-Atomen → Besetzungsinversion → spontane Emission in alle Richtungen



Stehende EM-Welle zwischen Spiegeln,
Abstand L zwischen Spiegeln: $L = n\lambda$

Versuch: Modell Laser

Lichterzeugung: Laser

(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Vorteile Laser:

- Extrem hohe Leistungsdichte und Fokussierbarkeit → Laserschweißen
- Extrem hochmonochromatisch → Spektroskopie
- Kohärente Strahlung → Interferenz
Beugung



Geometrische Optik

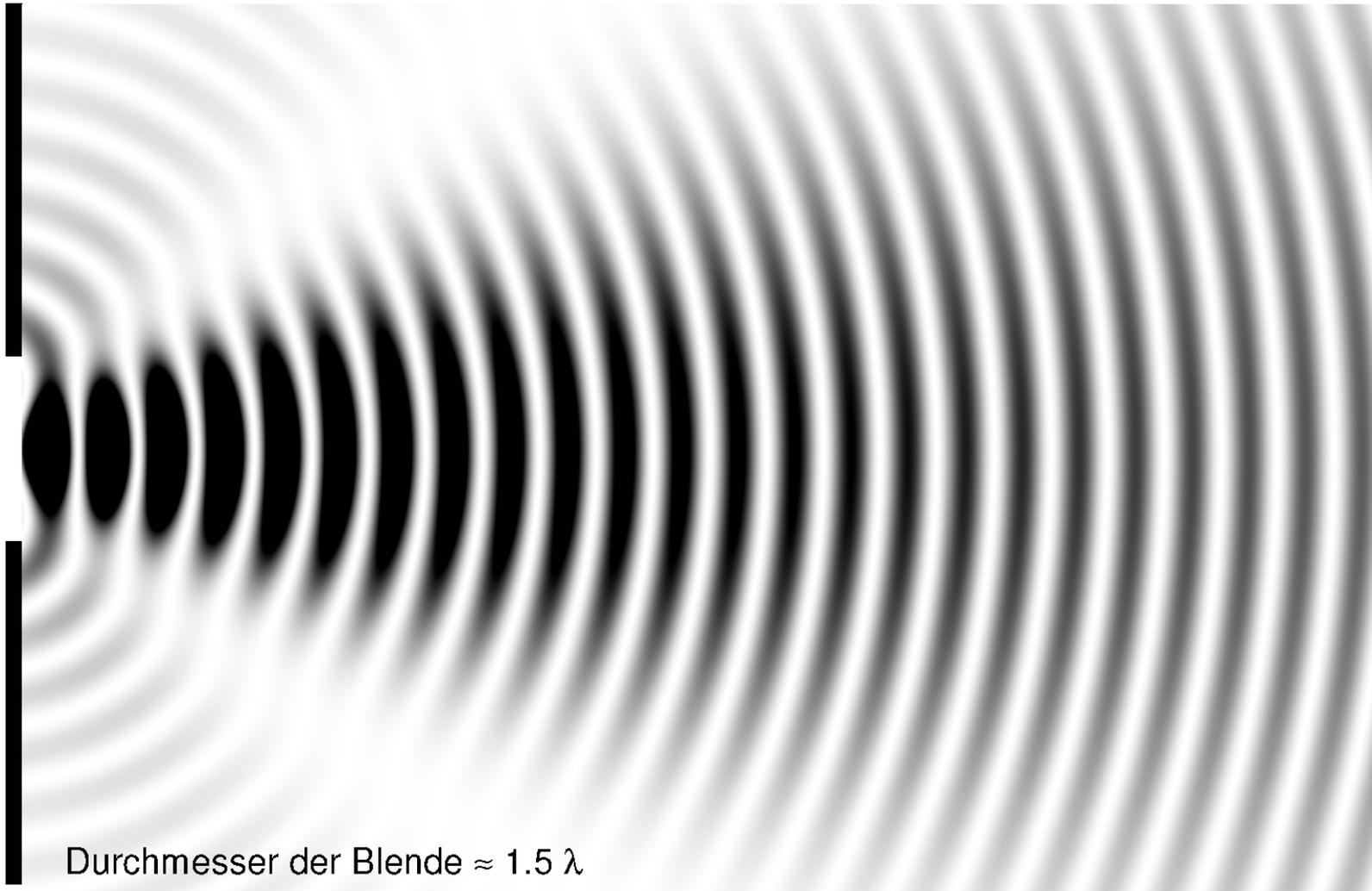
Idealisiertes Gebiet der Optik:

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, Polarisierung, Intensität, Wellenlänge, etc.

Lichtstrahl nach Blende

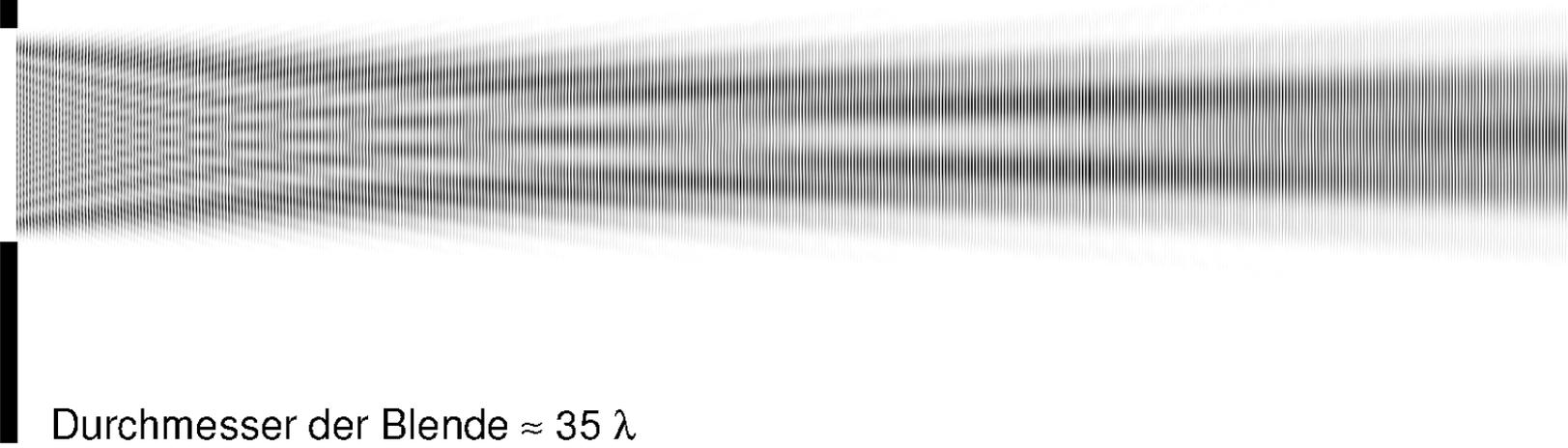


Lichtstrahl nach Blende



Durchmesser der Blende $\approx 7 \lambda$

The image shows a diffraction pattern from a slit with a diameter of approximately 7 wavelengths. The pattern consists of a central bright region with several distinct, well-defined side lobes on either side. The spacing between the lobes is relatively large, and the overall pattern is spread out horizontally.



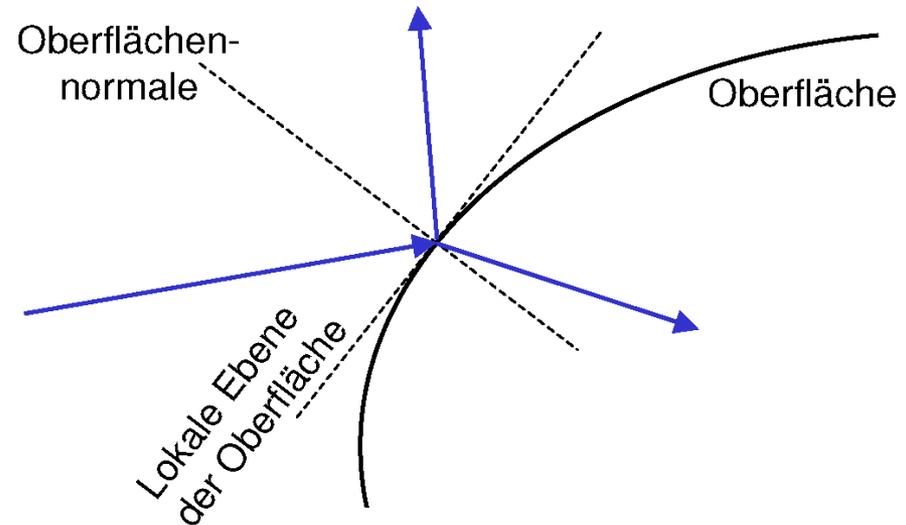
Durchmesser der Blende $\approx 35 \lambda$

The image shows a diffraction pattern from a slit with a diameter of approximately 35 wavelengths. The pattern is much narrower and more concentrated than the one above. It features a very sharp and bright central maximum, with side lobes that are significantly smaller and more closely spaced. The overall width of the pattern is much smaller.

Geometrische Optik

Grundregeln der geometrischen Optik:

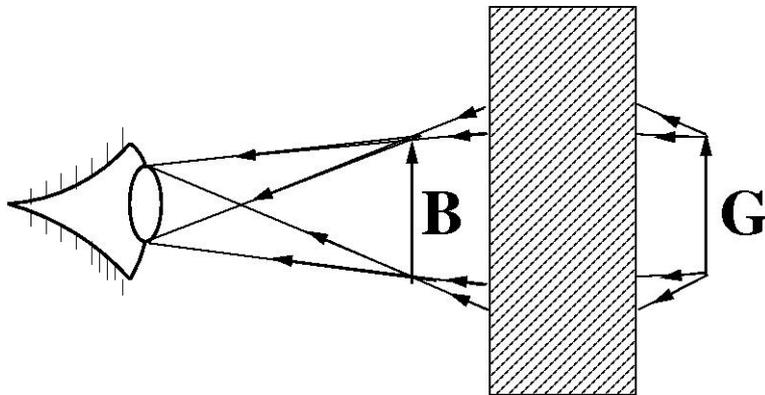
1. Lichtstrahlen sind Geraden in einem optisch homogenen und isotropen Medium (gilt z.B. nicht in Medien mit ortsabhängiger Dichte).
2. Reflexion der Lichtstrahlen an Grenzflächen gemäß Reflexionsgesetz (Einfallswinkel = Ausfallswinkel gemessen zur Oberflächennormalen)
3. Brechung der Lichtstrahlen gemäß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



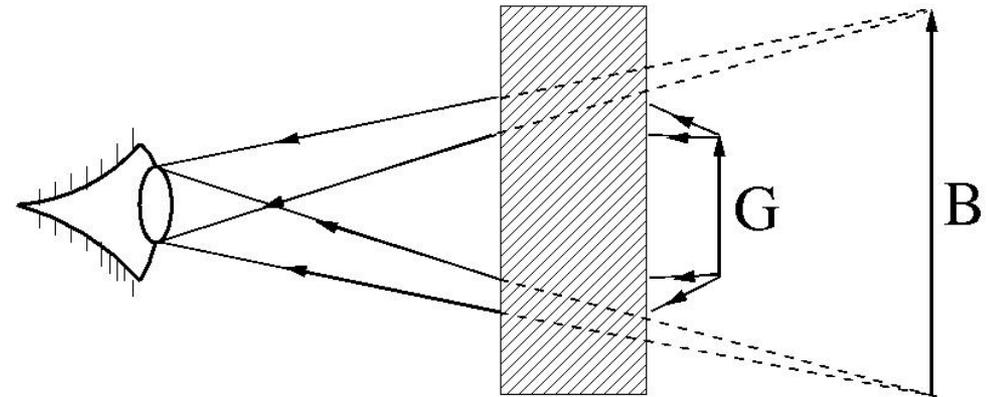
Konzept der optischen Abbildung:

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)

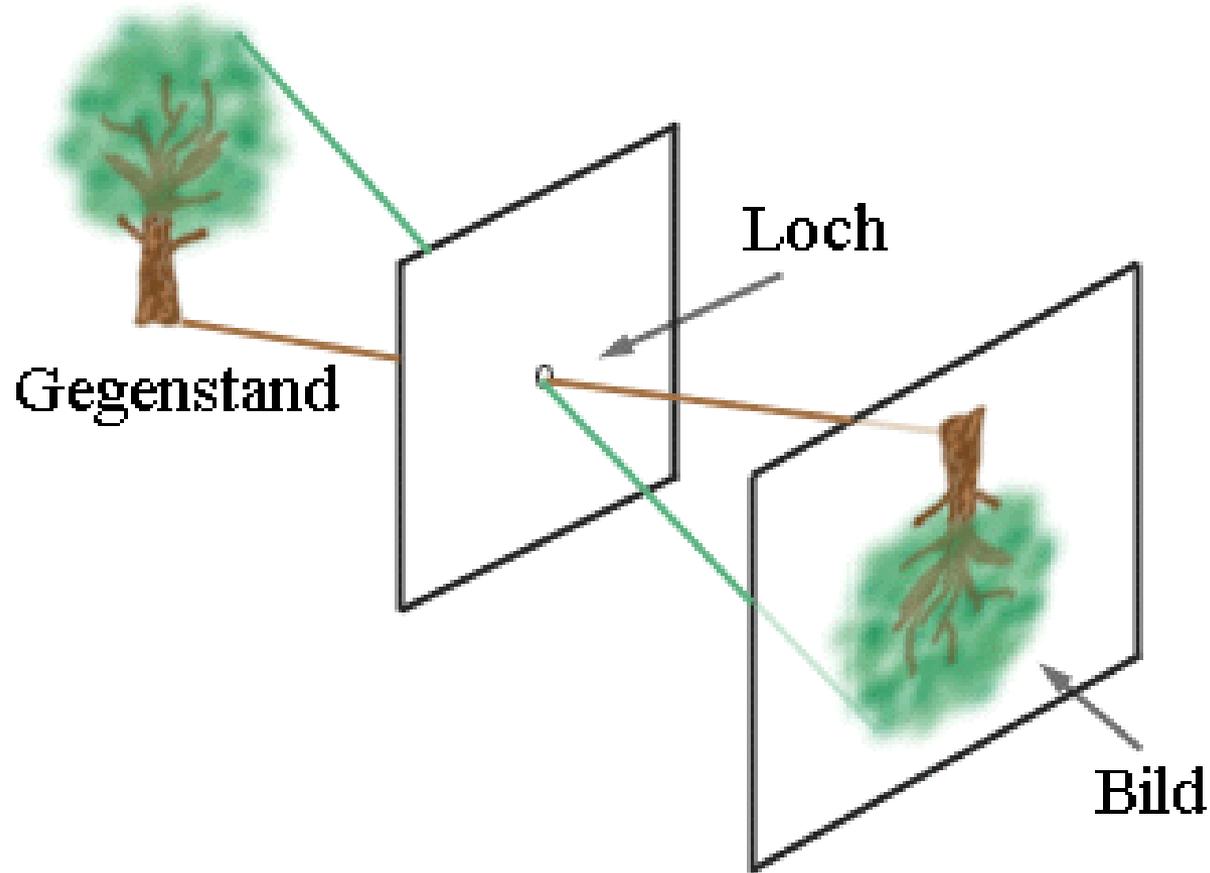


Reelles Bild: Ein Bild, das mit einem Schirm aufgefangen werden kann



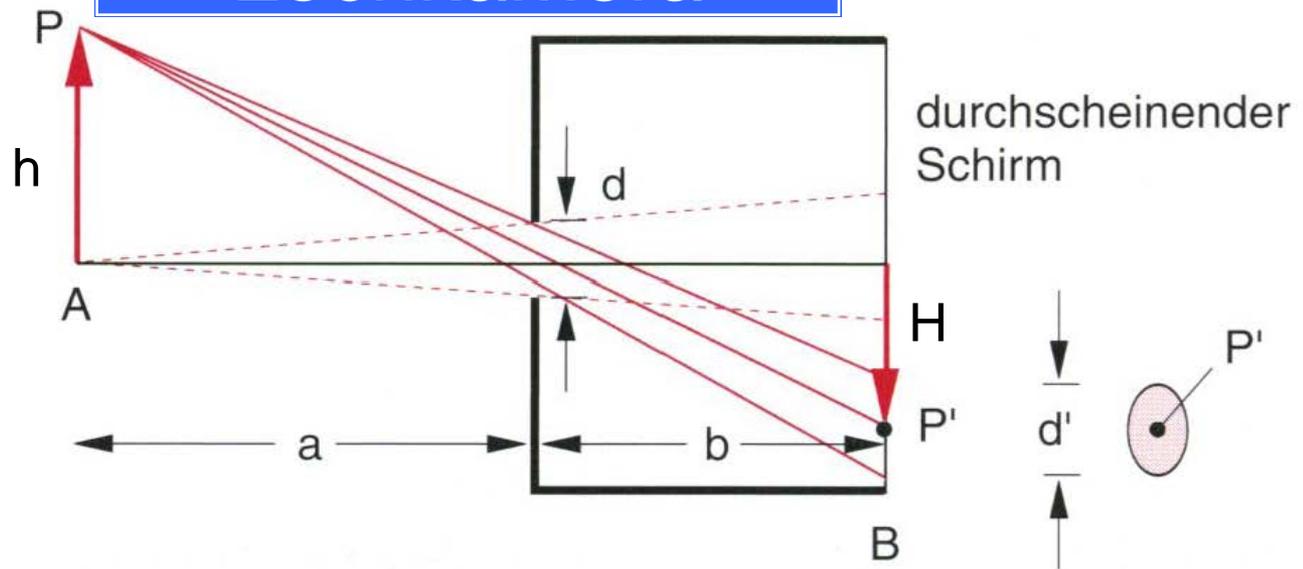
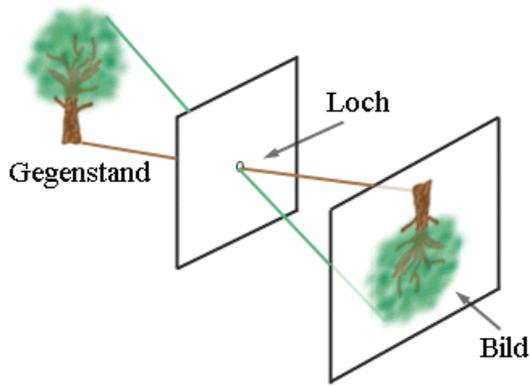
Virtuelles Bild: Ein Bild, das nicht mit einem Schirm aufgefangen werden kann

Einfachstes optisches Gerät: Lochkamera



Versuch: Lochkamera

Lochkamera



Licht von jedem Gegenstandspunkt wird auf einen Punkt des Bildes abgebildet, hier: Punkt P \rightarrow Kreisscheibe um P'

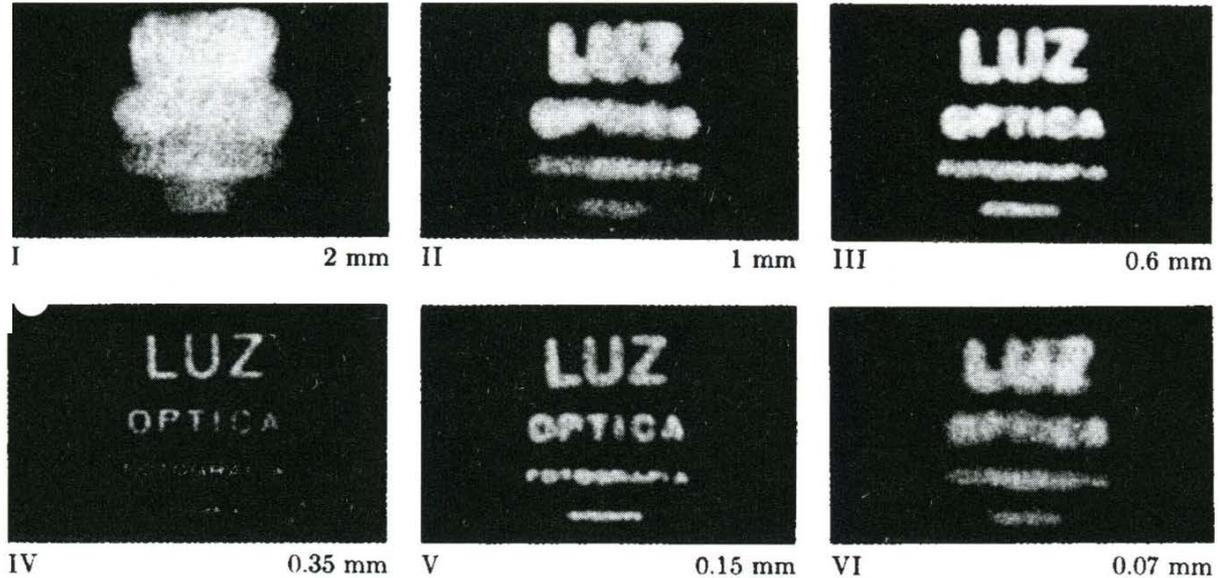
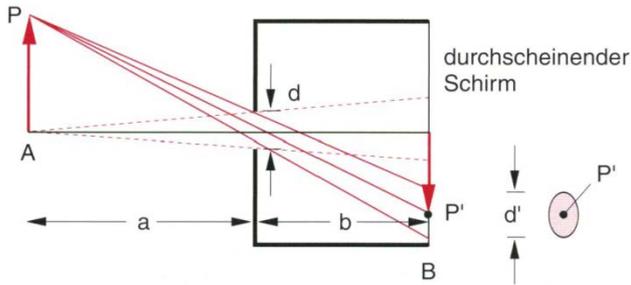
Strahlensatz:
$$\frac{d'}{(a+b)} = \frac{d}{a}$$

\emptyset Kreis(P'):
$$d' = \frac{d(a+b)}{a}$$

durch Abstand und Lochdurchmesser gegeben

Abbildungsmaßstab (Vergrößerung): $V = H / h = b / a$

Lochkamera

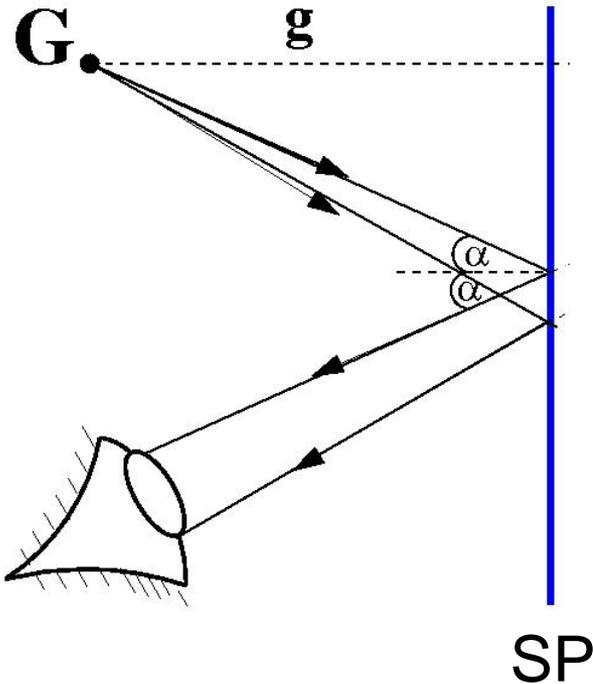


1. Lochdurchmesser d größer: größerer Bildbereich von einem Gegenstandspunkt beleuchtet \rightarrow schlechte Auflösung, Überlapp der Kreisscheiben um P , Bild wird unscharf
2. Lochdurchmesser d so klein wie Wellenlänge λ , dann wird der vom Gegenstandspunkt beleuchtete Bildbereich durch den Beugungswinkel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

Ebener Spiegel



Versuch: ebener Spiegel Haftoptik

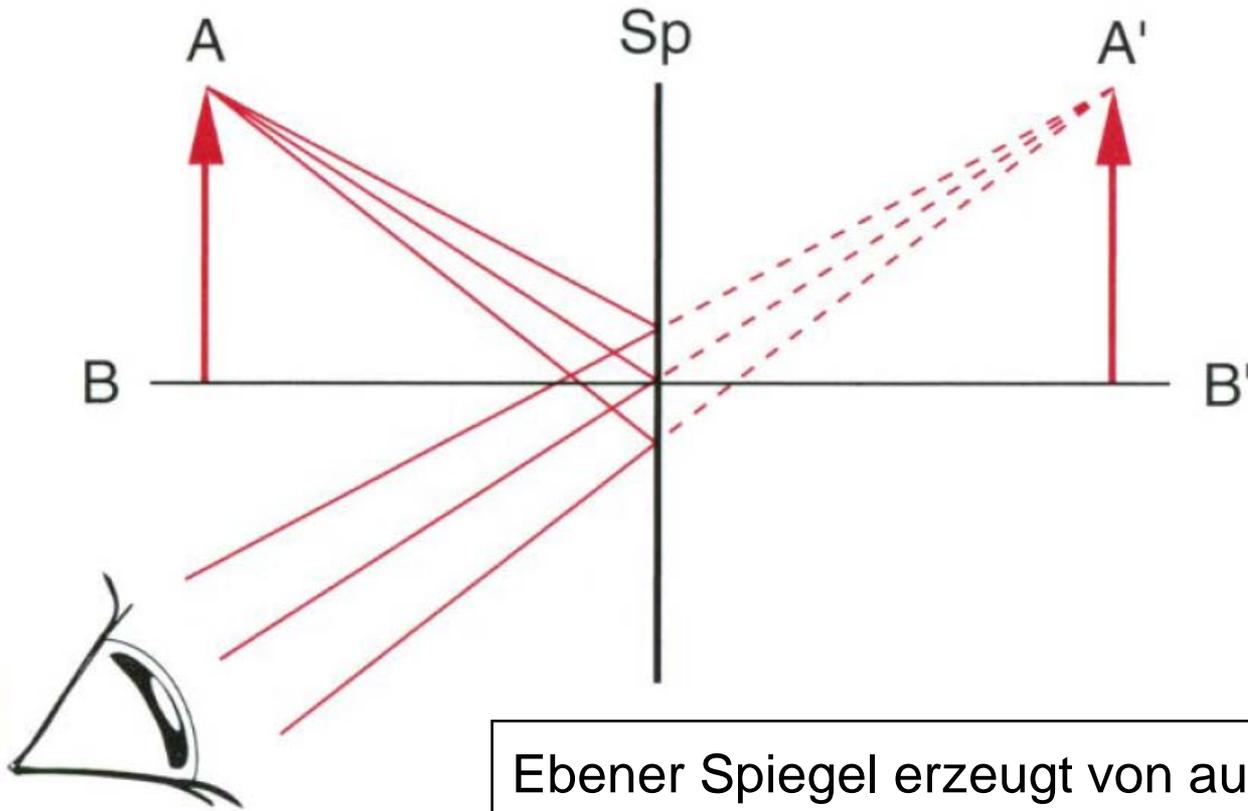
Einfallswinkel = Ausfallswinkel

Versuch: ebener Spiegel Bühne

G und B liegen auf gleicher Spiegelnormale,
Abstände vom Spiegel gleich groß
(Gegenstandsweite g = Bildweite b)

Am Auge ankommende Lichtstrahlen sind identisch zu denen eines Objektes am Ort des virtuellen Bildes. Gehirn interpretiert das Licht immer so, als breitet es sich geradlinig aus. Gesehen wird ein Bild an dem Ort, an dem sich die geradlinige Verlängerung der Strahlen in einem Punkt treffen.

Ebener Spiegel



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 $f = \overline{OF}$

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

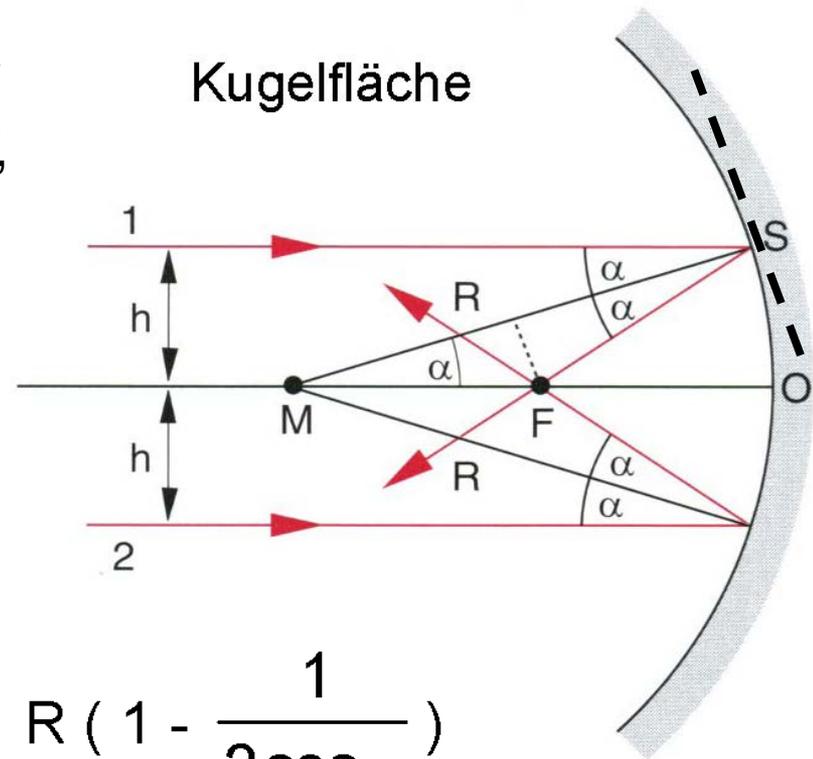
$$f = \overline{OF} = R - \overline{FM} = R - \frac{R}{2 \cos \alpha} = R \left(1 - \frac{1}{2 \cos \alpha} \right)$$

Achsennahe Strahlen:

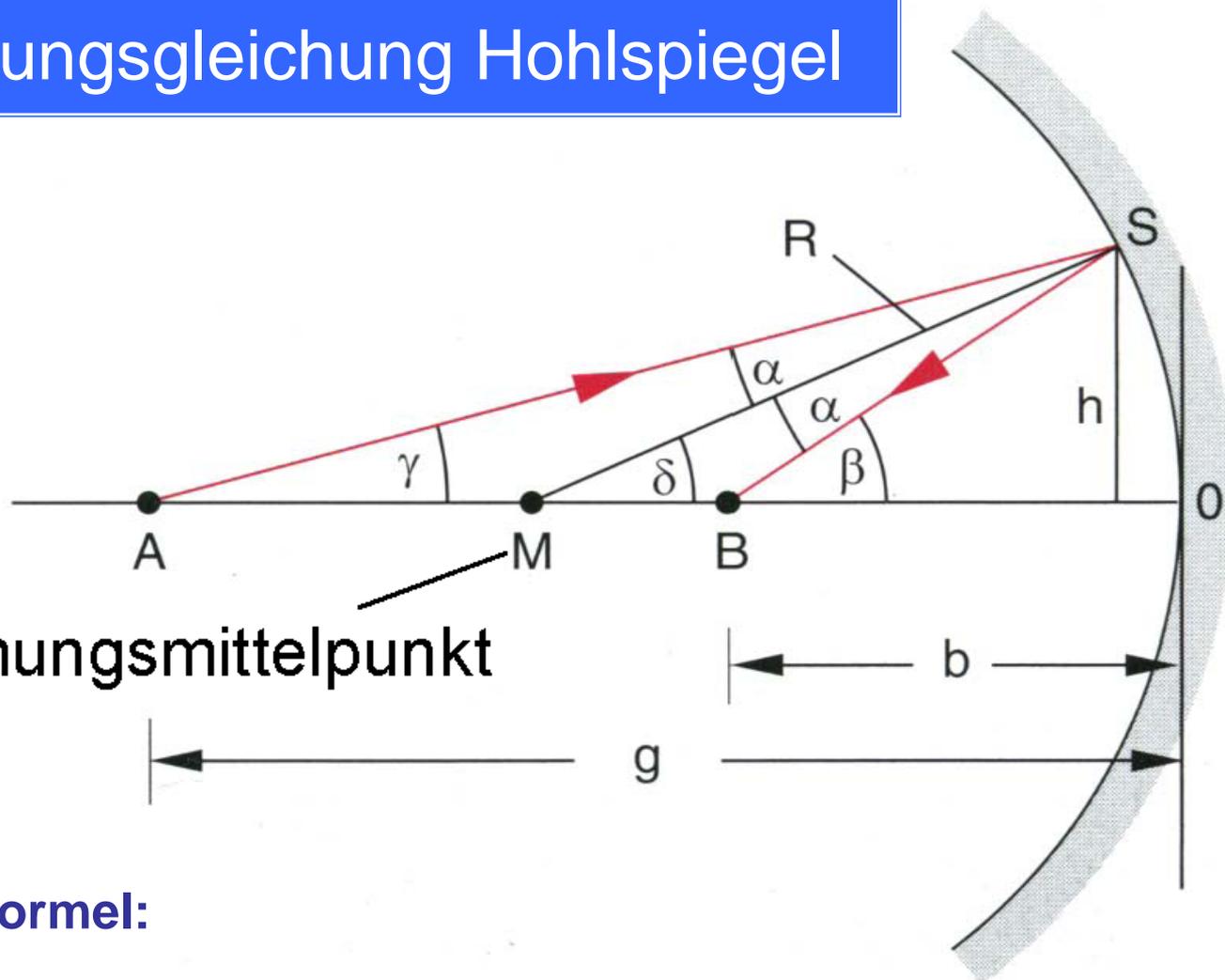
für kleine Winkel α ($h/R \ll 1$) gilt $\cos \alpha \approx 1$,

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

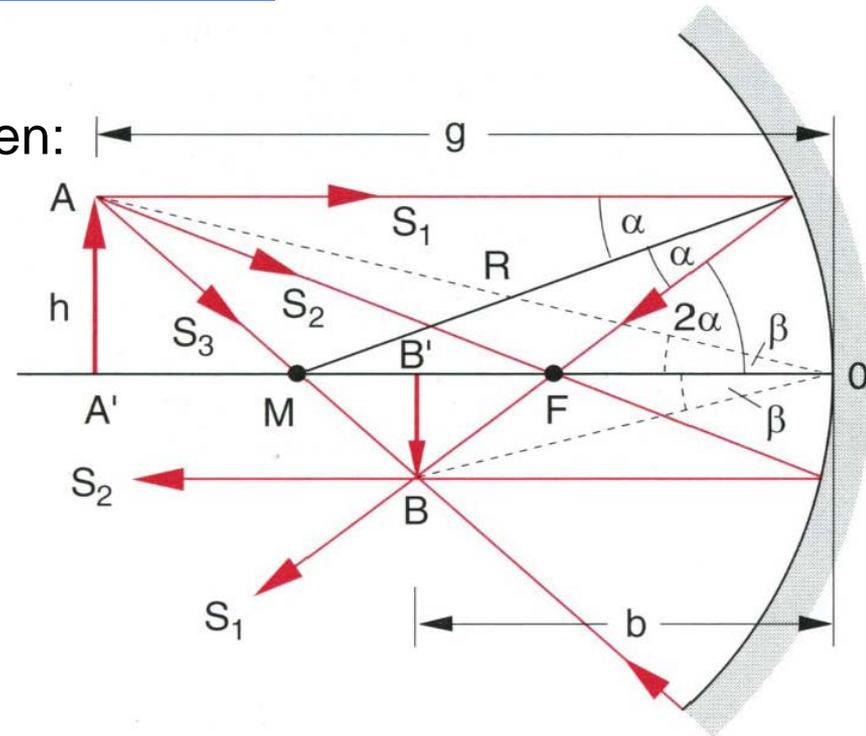
Konstruktion eines Bildpunktes:

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.



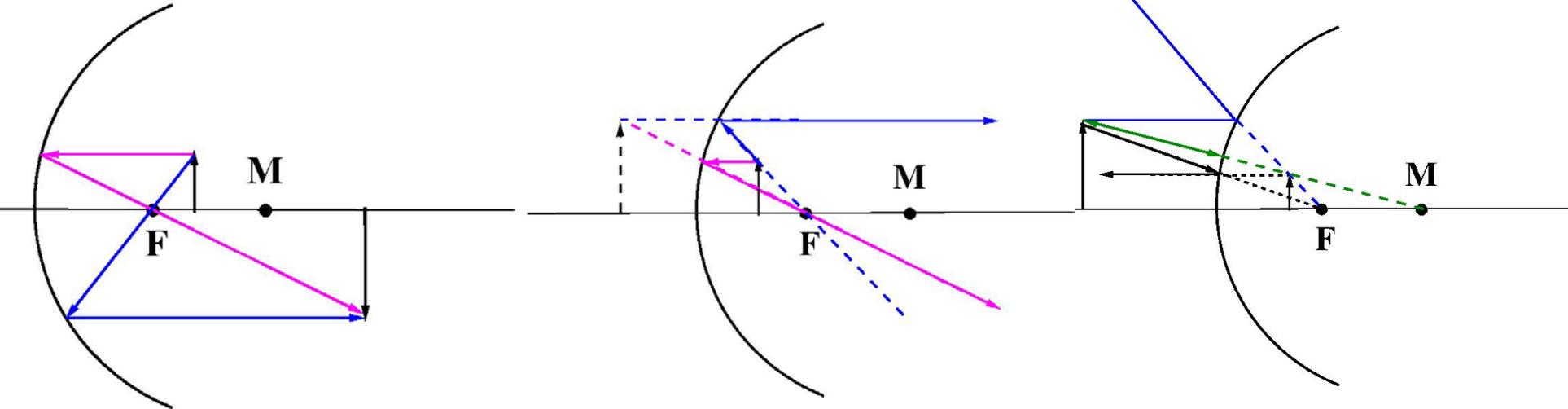
$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} \approx \frac{2}{R} \approx \frac{1}{f}$$

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

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

Hohlspiegel

Versuch: Abbildung Hohlspiegel



Gegenstandsweite	Bildweite	Bild		Vergrößerung
$2f < g \leq \infty$	$f \leq b < 2f$	umgekehrt	reell	< 1
$2f = g$	$2f = b$	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

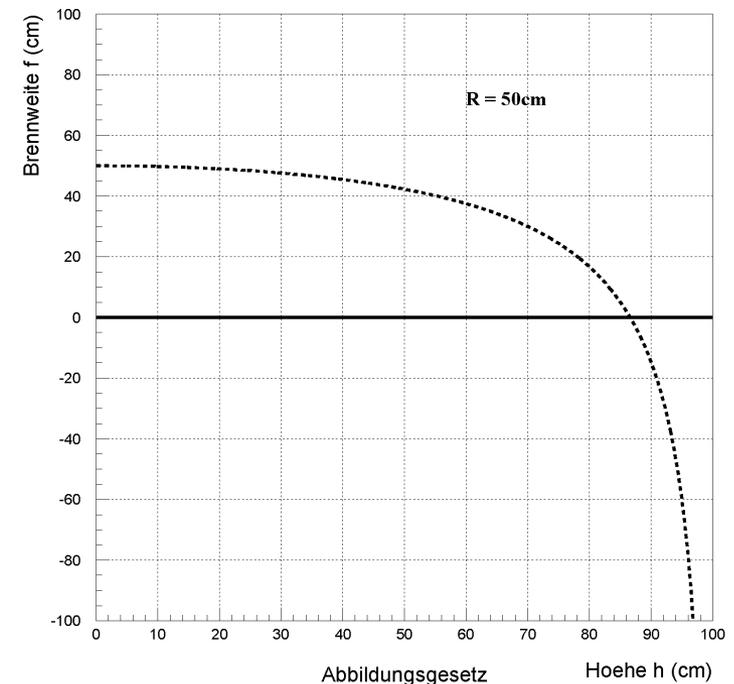
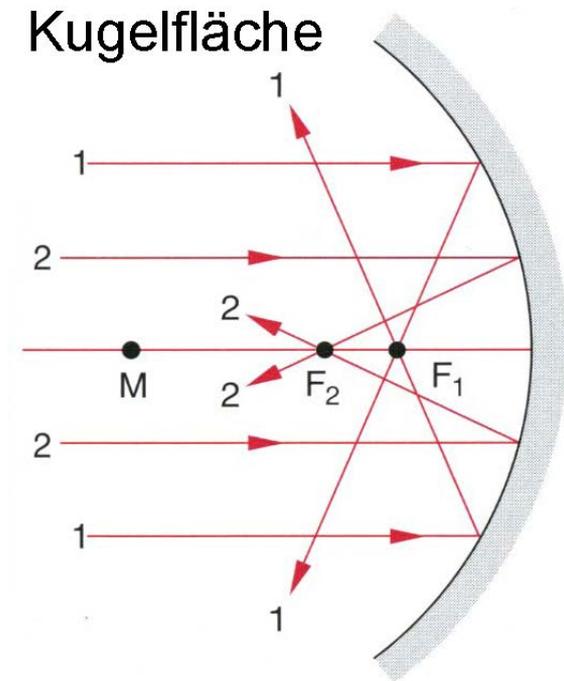
Hohlspiegel. Sphärische Aberration

Versuch: Hohlspiegel Abbildungsfehler

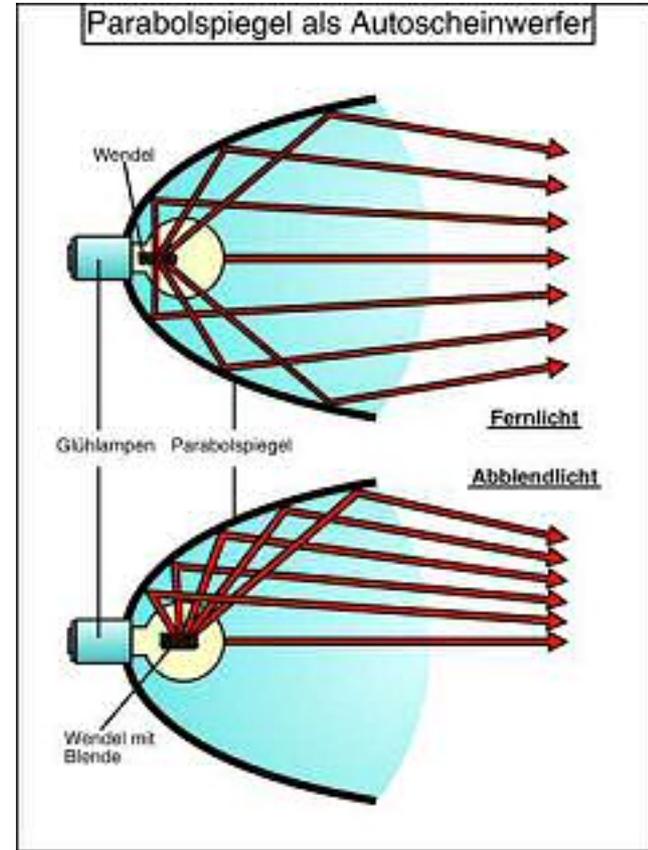
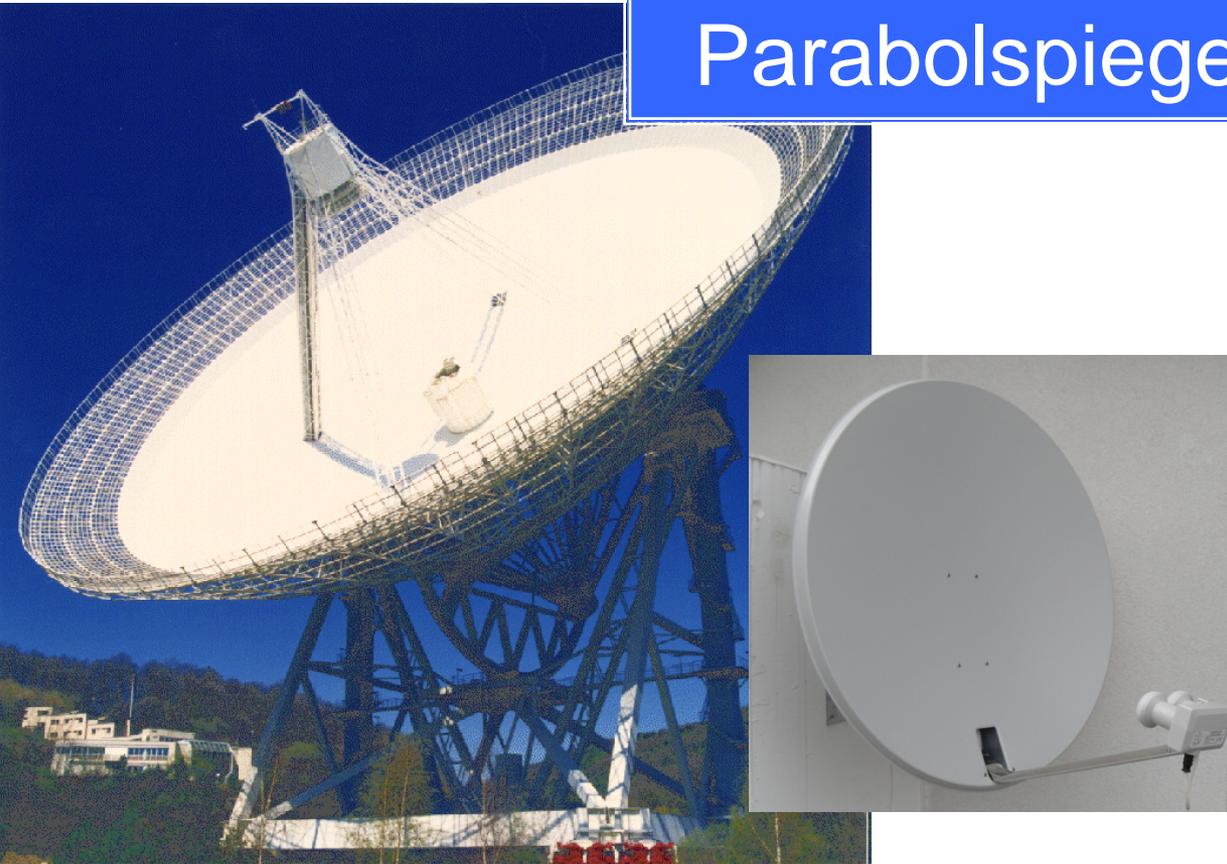
Näherung $h/R \ll 1$ nicht mehr gültig für achsferne Strahlen:

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

Sphärische Aberration (Katakaustik)



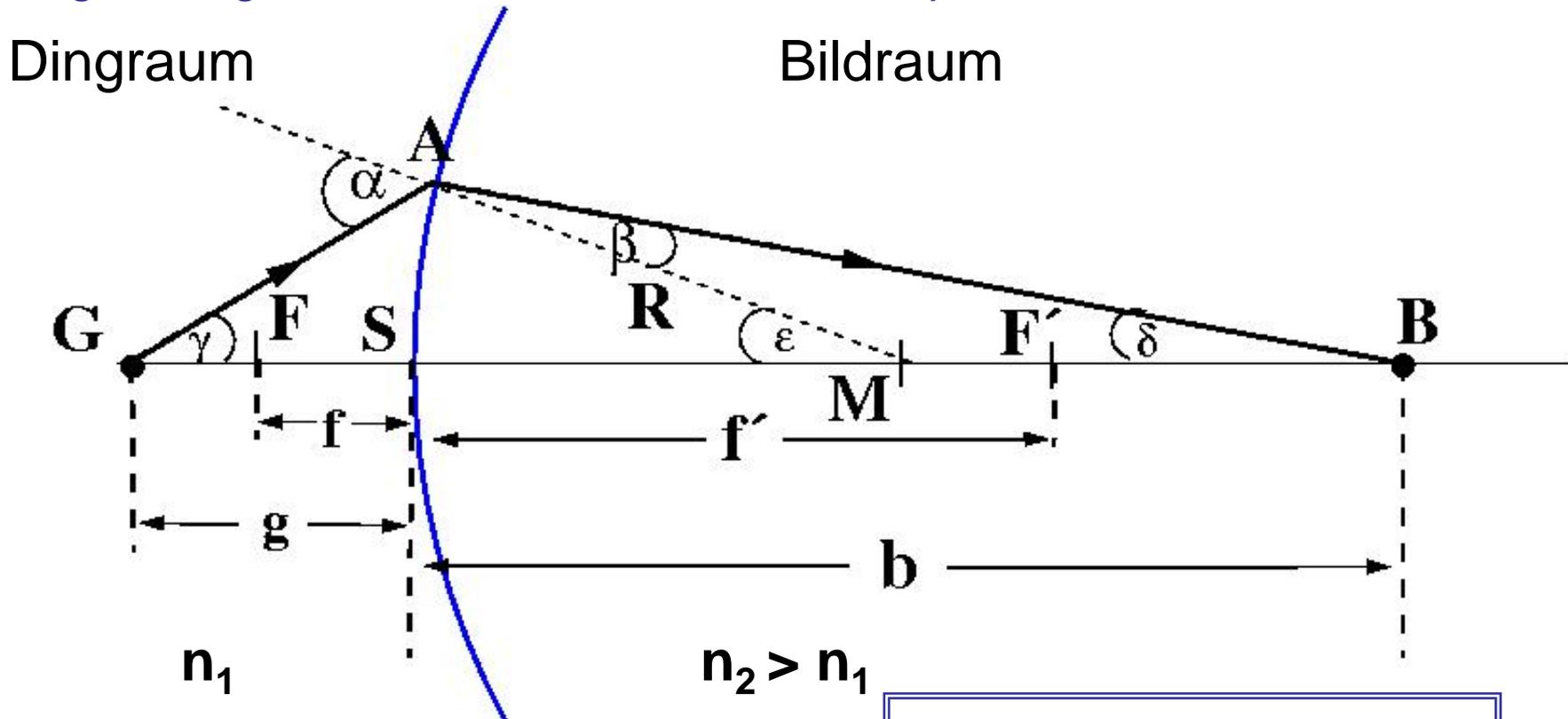
Parabolspiegel



100m Radioteleskop am Max-Planck Institut für Radioastronomie in Effelsberg,
Wellenlängen: 0.35mm bis 15m
Die Leistung des empfangenen Signals ist proportional zur Fläche $P = I A$
Der Durchmesser bestimmt das Winkelauflösungsvermögen. Hier: $\Delta\theta = 35$ Bogensekunden
Die Abweichung von der idealen Parabelform ist kleiner als 0.5mm, Brennweite = 30 m

Linsen

Brechung an Kugelfläche mit Radius R und Mittelpunkt M:



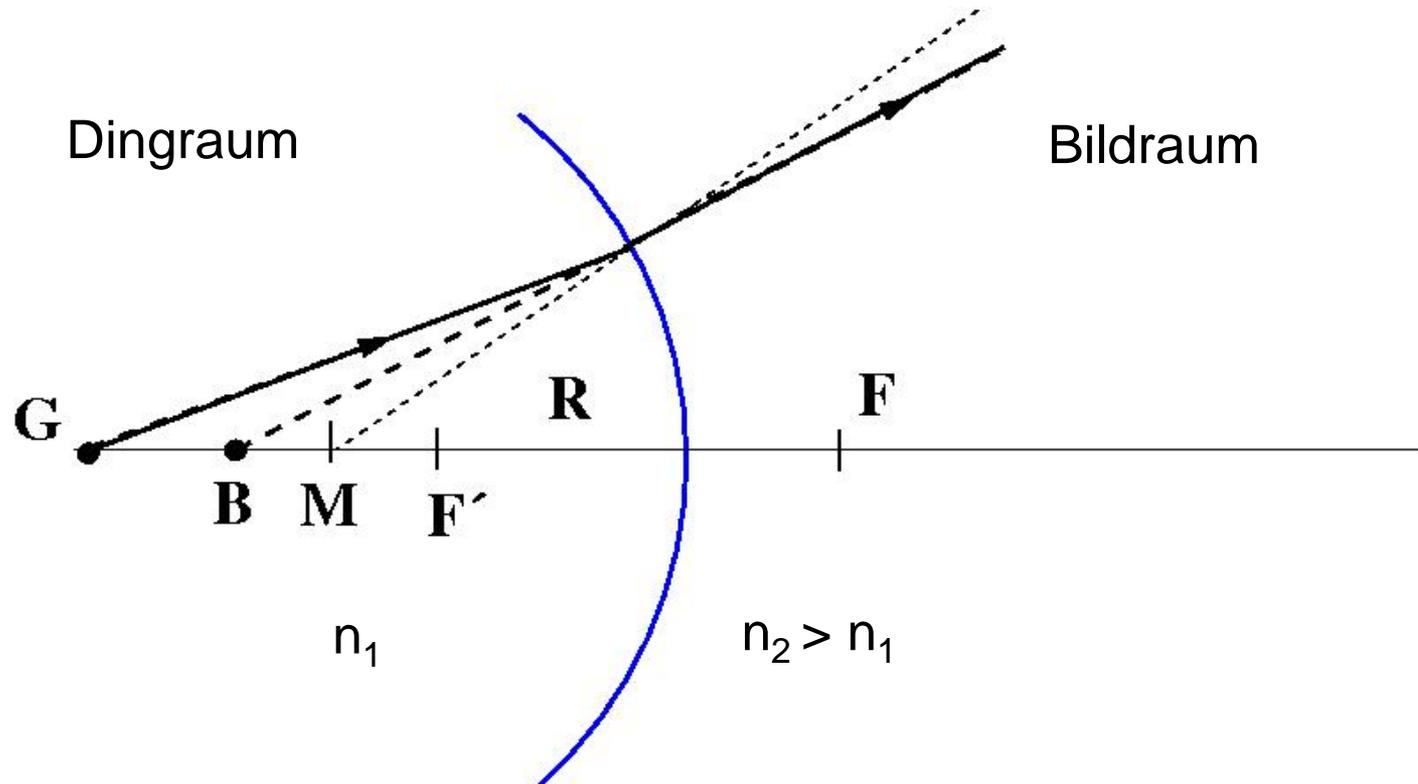
Abbildungsgleichung für konvexe Seite: \rightarrow

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

Abbildungsmaßstab:

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

Linsen

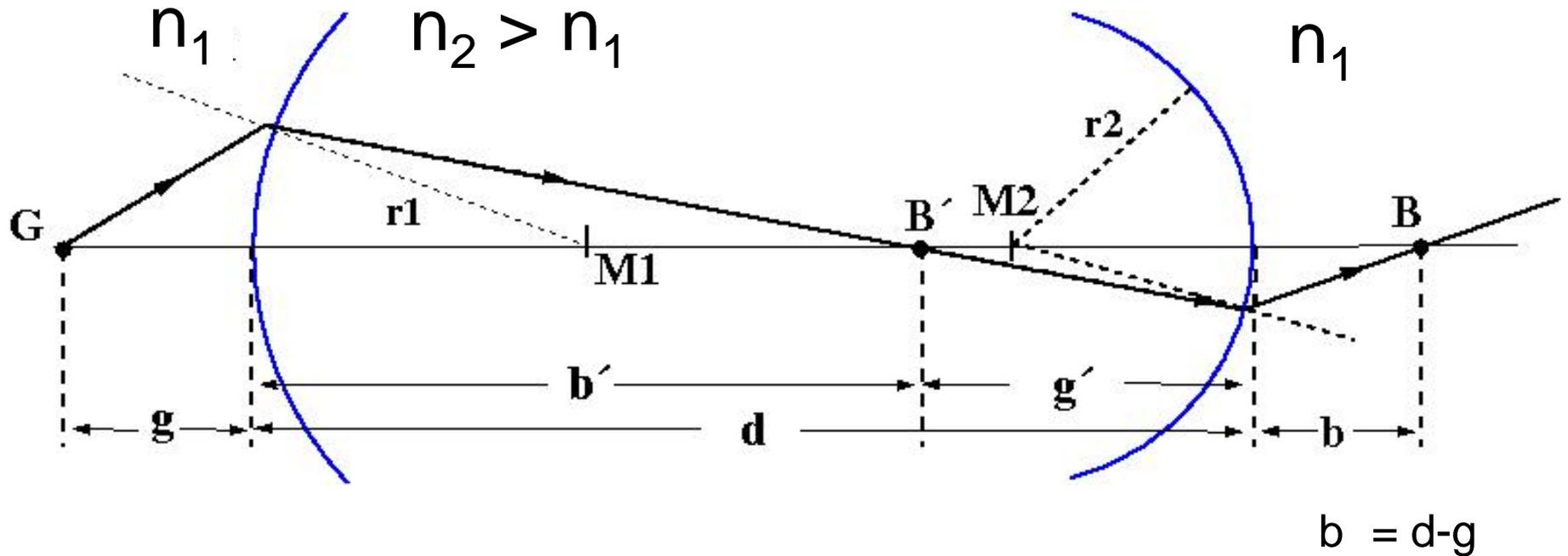


Fundamentale Abbildungsgleichung für konkave Seite:

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

Sammellinsen

Abbildungsgleichung für dünne bikonvexe Sammellinsen:



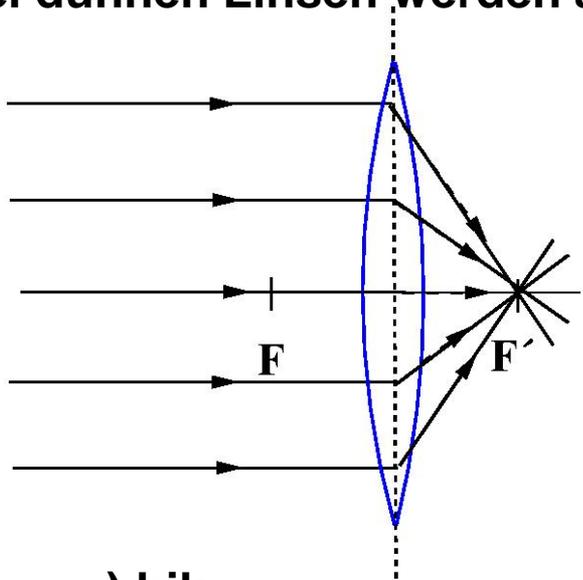
Abbildungsgleichung für dünne bikonvexe Sammellinsen
(Linsenschleiferformel):

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

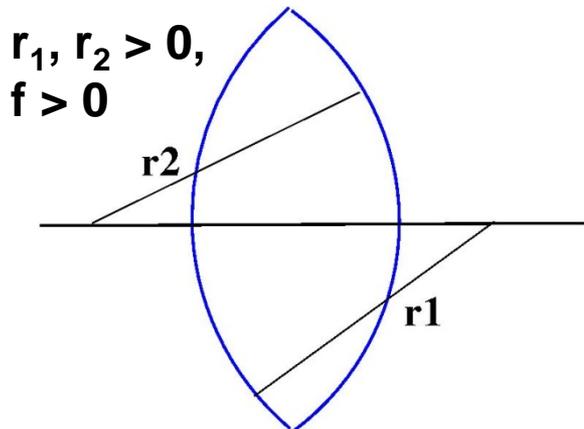
Sammellinsen

Versuch: Sammellinse Haftoptik, Strahl aus unendlichem

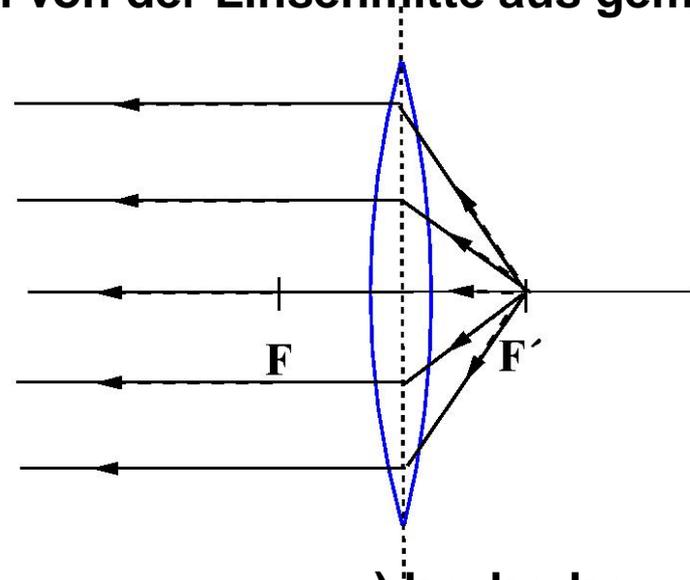
Bei dünnen Linsen werden alle Strecken von der Linsenmitte aus gemessen



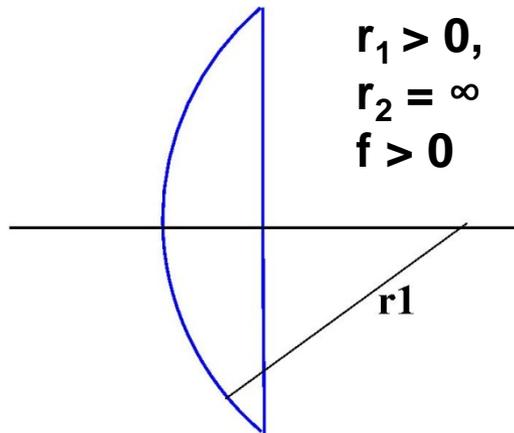
a) bikonvex



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

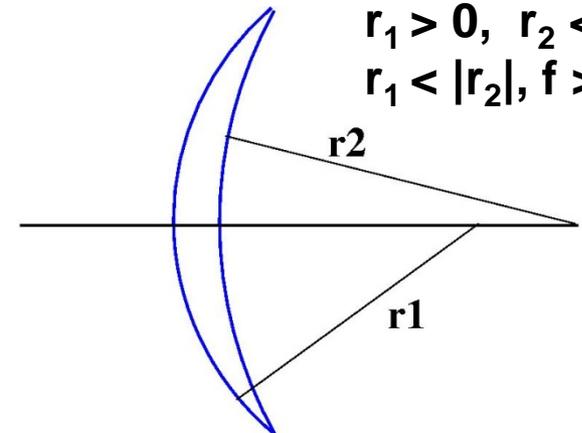


b) plankonvex,



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

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.

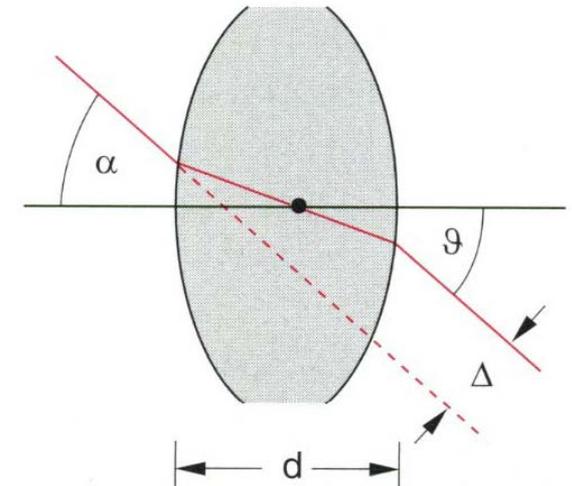
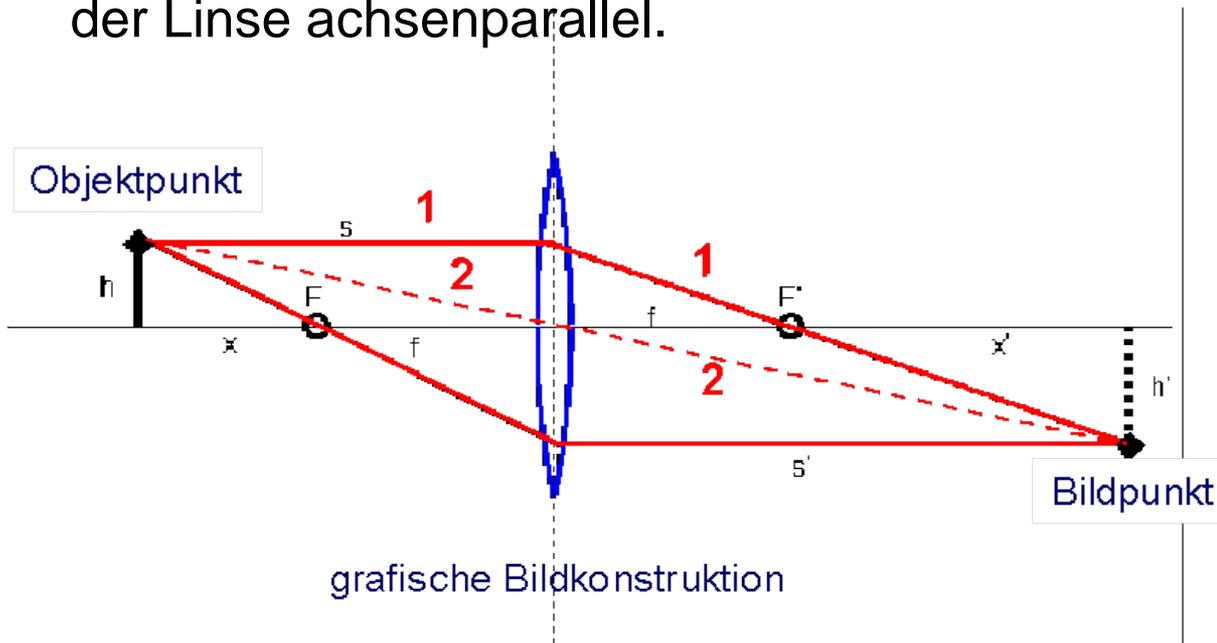
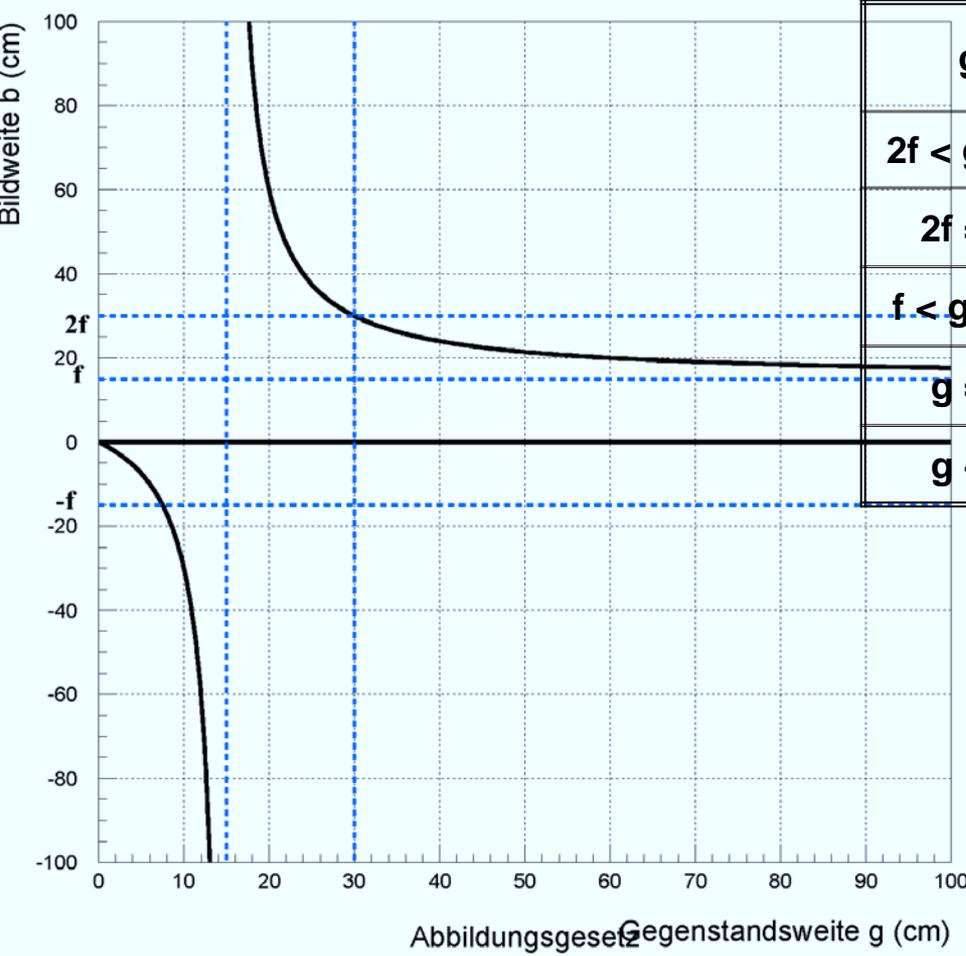


Abbildung mit dünnen Sammellinsen

Versuch: Sammellinse Abbildungsgesetz

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



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	$-\infty < V < -1$

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

Versuch: Linse im Wasser