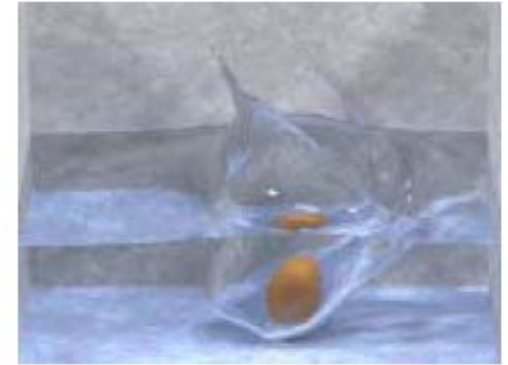
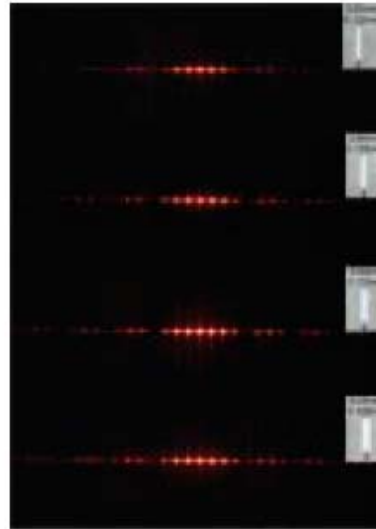


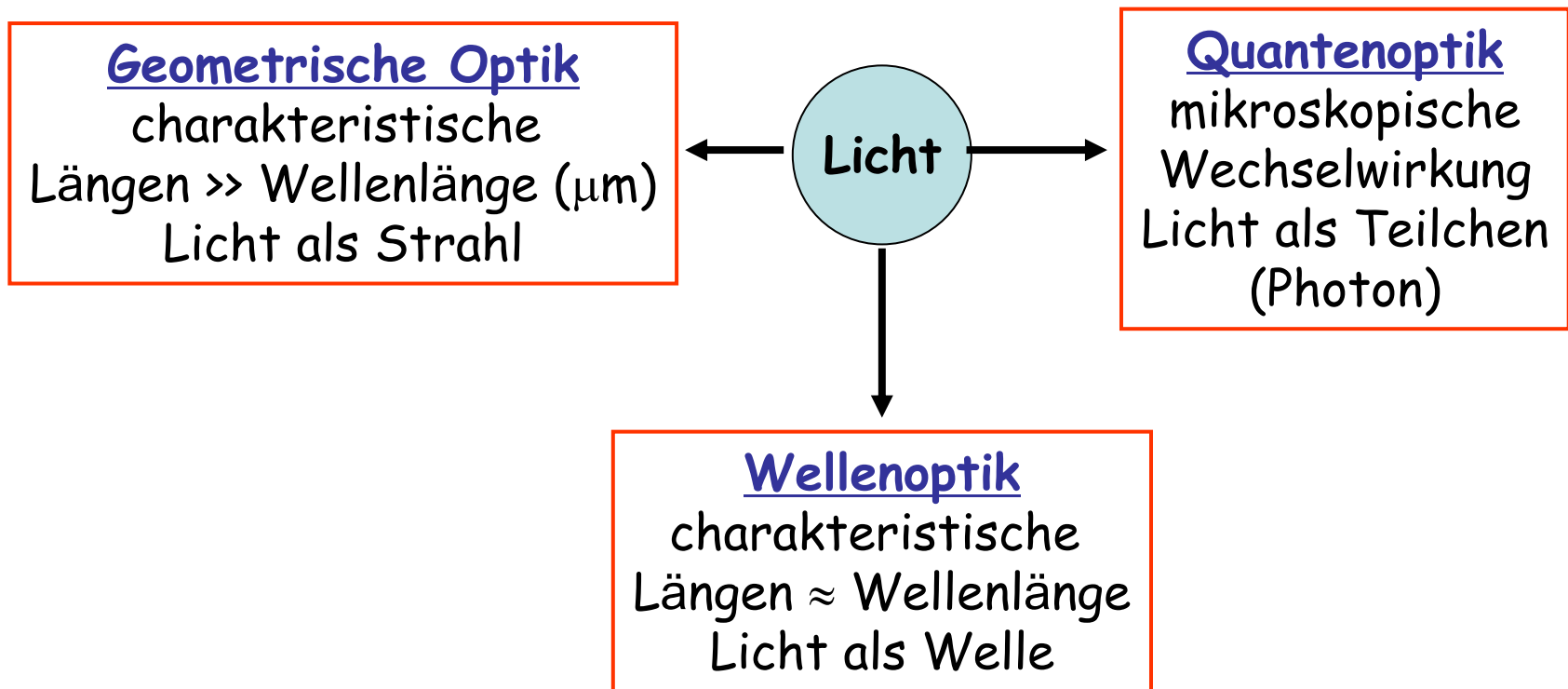
V, Optik

V.I Geometrische Optik

Optik



Beschreibungen des Lichts



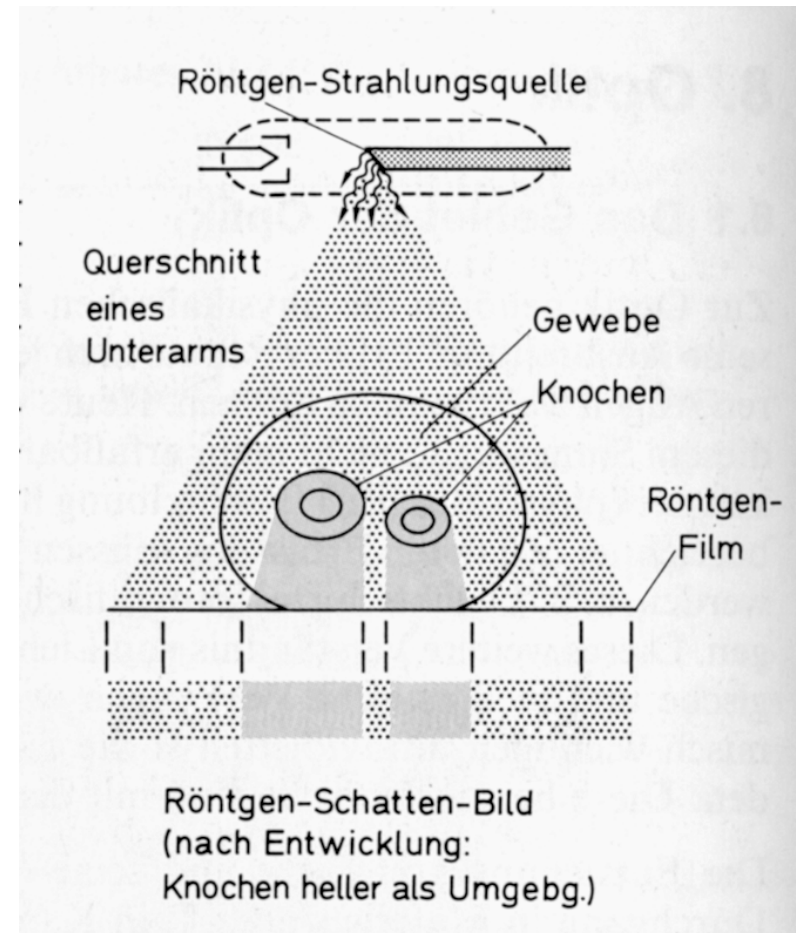
- Die mit Wellen- und Teilchencharakter des Lichts verbundenen Phänomene gehen fließend ineinander über.
- Die Modellbeschreibungen sind immer nur Näherungen, die auf die jeweilige Problemstellung zugeschnitten sind

Lichtstrahlen

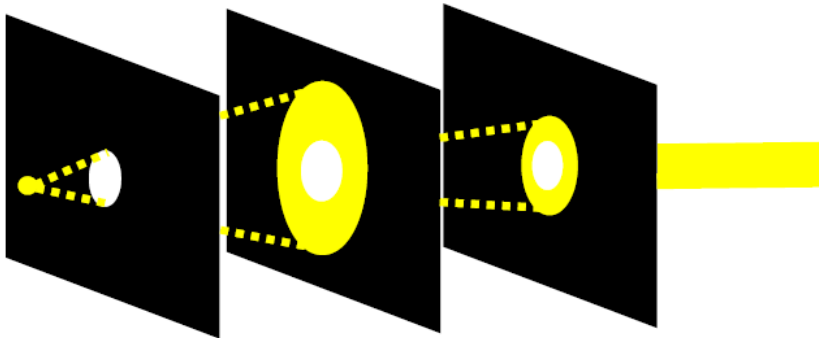


- **Lichtstrahl:** Licht breitet sich in einem homogenen Medium geradlinig aus.

Schattenwurf: Röntgenbild

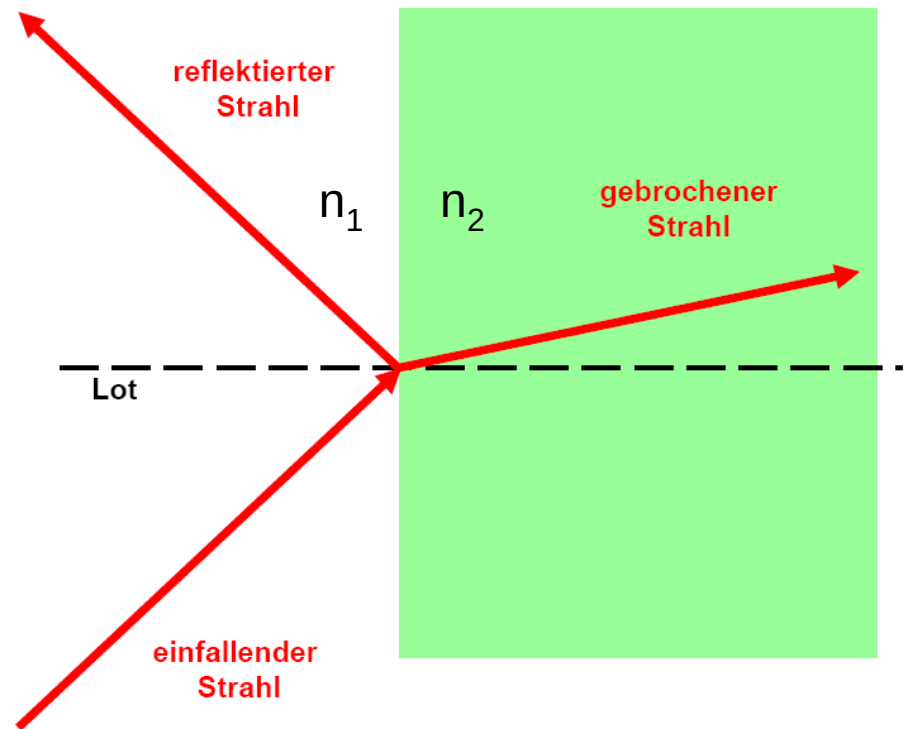


- Realisierung eines näherungsweise parallelen **Lichtbündels** durch Ausblenden:



Reflexion und Brechung an Grenzflächen

- trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zwischen Medien mit unterschiedlichen Brechzahlen, dann wird ein Teil des Lichts reflektiert und der transmittierte Teil wird gebrochen
 - Reflexion
 - Brechung
- bei senkrechtem Einfall wird der Strahl teilweise in sich selbst zurückreflektiert
- Reflexion und Brechung finden nur an der Grenzfläche statt



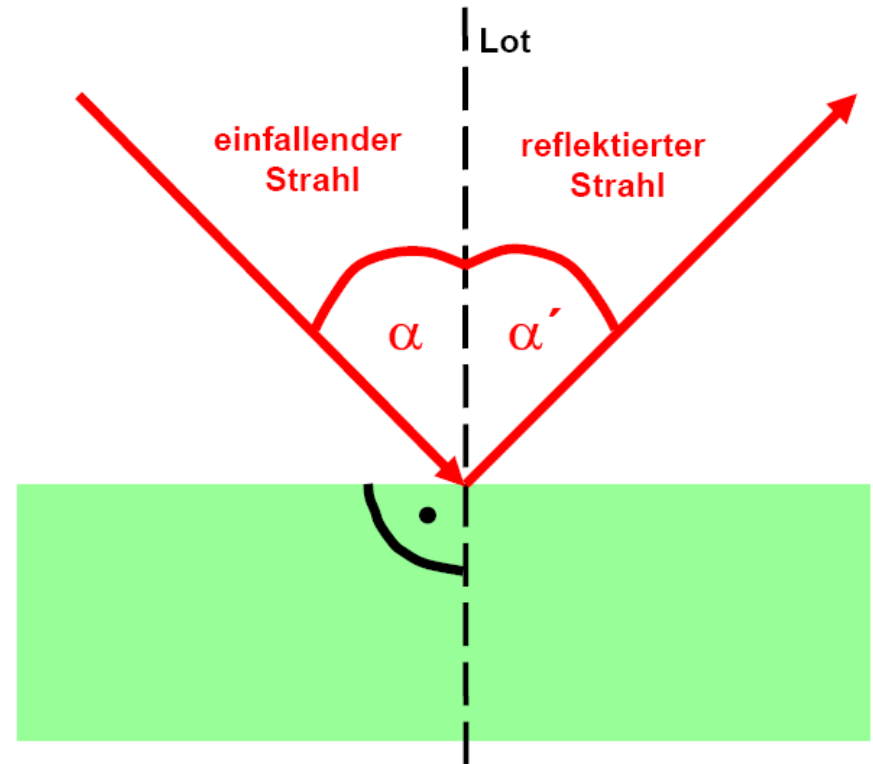
Reflexionsgesetz

Reflexionsgesetz:

Einfallswinkel = Ausfallswinkel

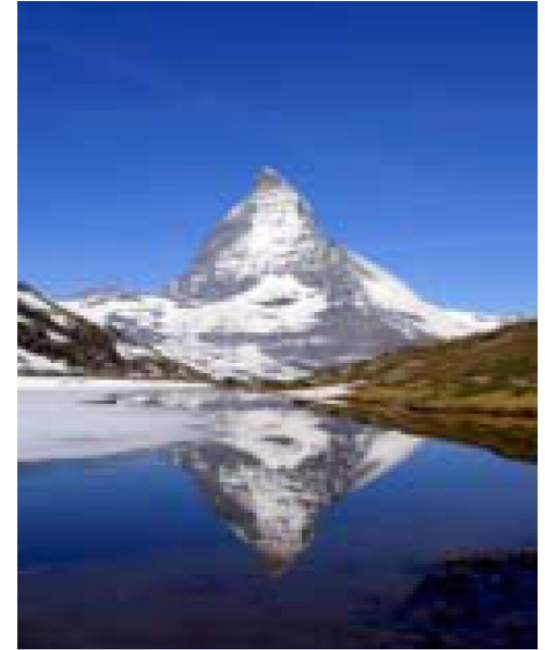
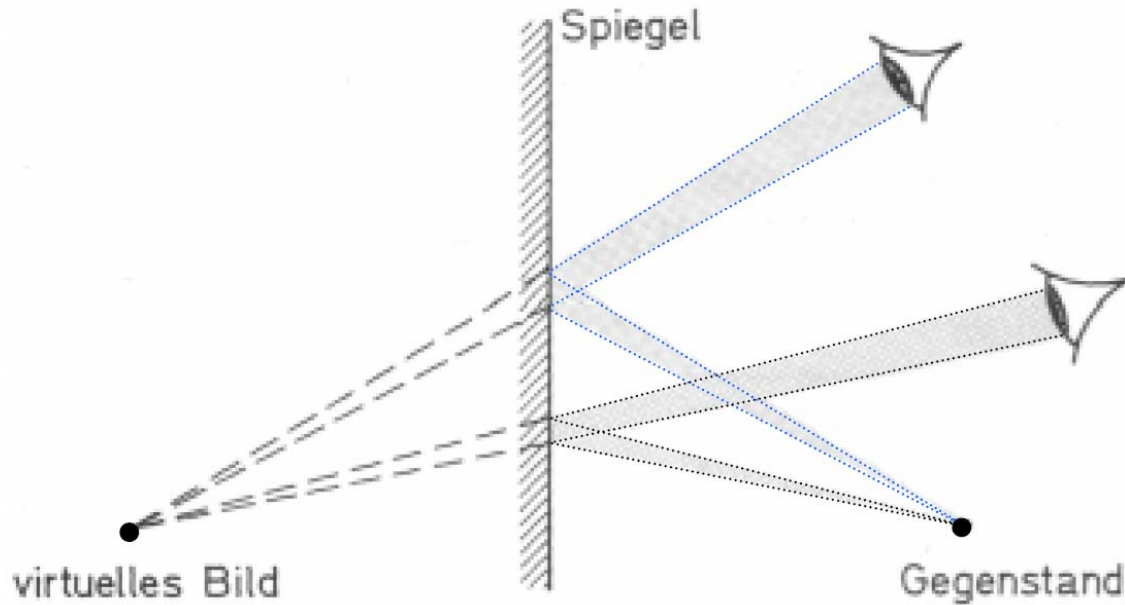
$$\alpha = \alpha'$$

- Konvention: in der Optik werden Winkelangaben relativ zum Lot gemacht
- einfallender und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene



Reflexions-
gesetz

Abbildung beim ebenen Spiegel

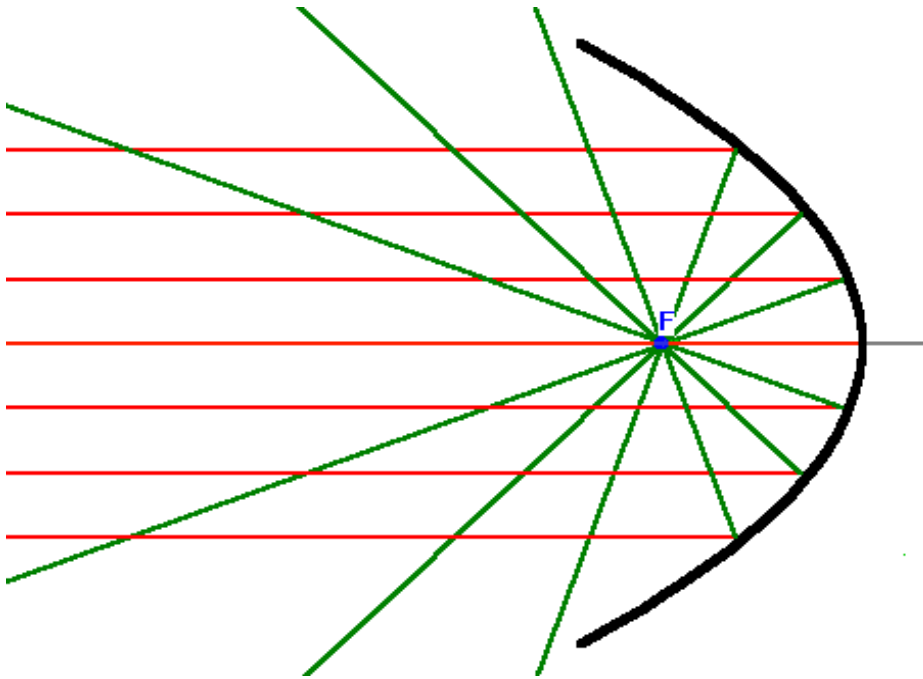


- **virtuelles Bild** entsteht nicht direkt, sondern durch Täuschung des beobachtenden Auges durch geradlinige Verlängerung der wahrgenommenen Lichtstrahlen



Sphärischer und parabolischer Spiegel

Parabolspiegel:

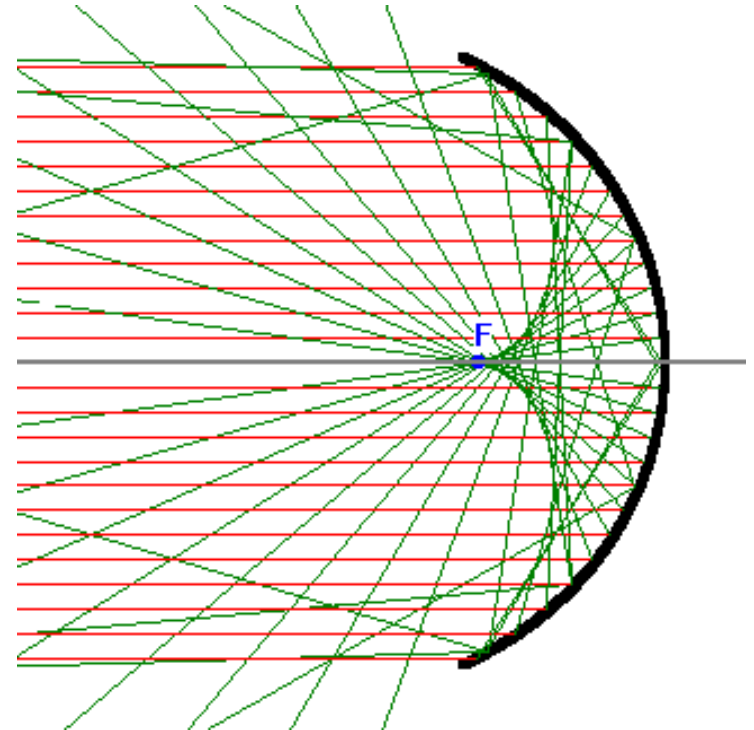


- alle einfallenden achsenparallelen Strahlen schneiden sich nach Reflexion exakt im **Brennpunkt F**



Parabolspiegel

Sphärischer Hohlspiegel:



- Achsenferne Strahlen gehen nach Reflexion nicht durch den **Brennpunkt F**:

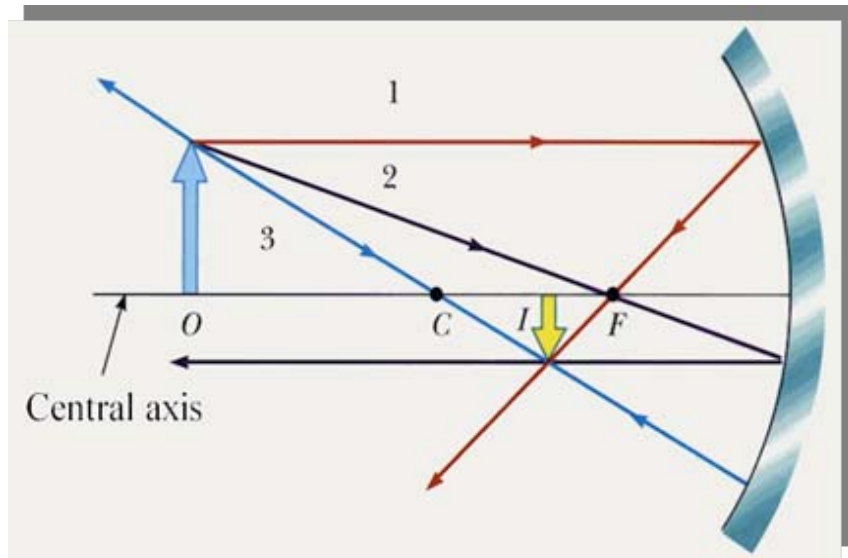


Sphärischer
Hohlspiegel

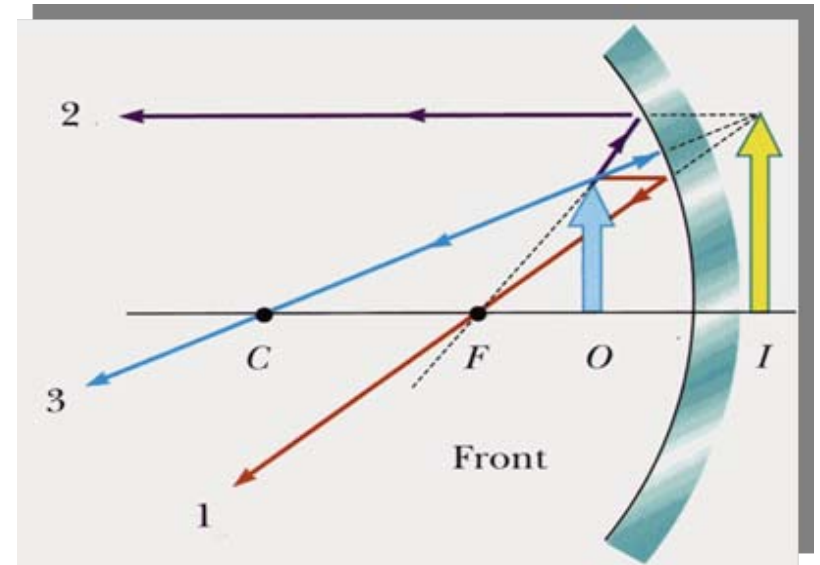
Abbildung beim Hohlspiegel

- 1: achsenparalleler Strahl verläuft nach Reflexion durch Brennpunkt
- 2: Brennpunktstrahl verläuft nach Reflexion achsenparallel
- 3: radialer Strahl wird in sich selbst reflektiert

Gegenstand außerhalb der Brennweite:



Gegenstand innerhalb der Brennweite:

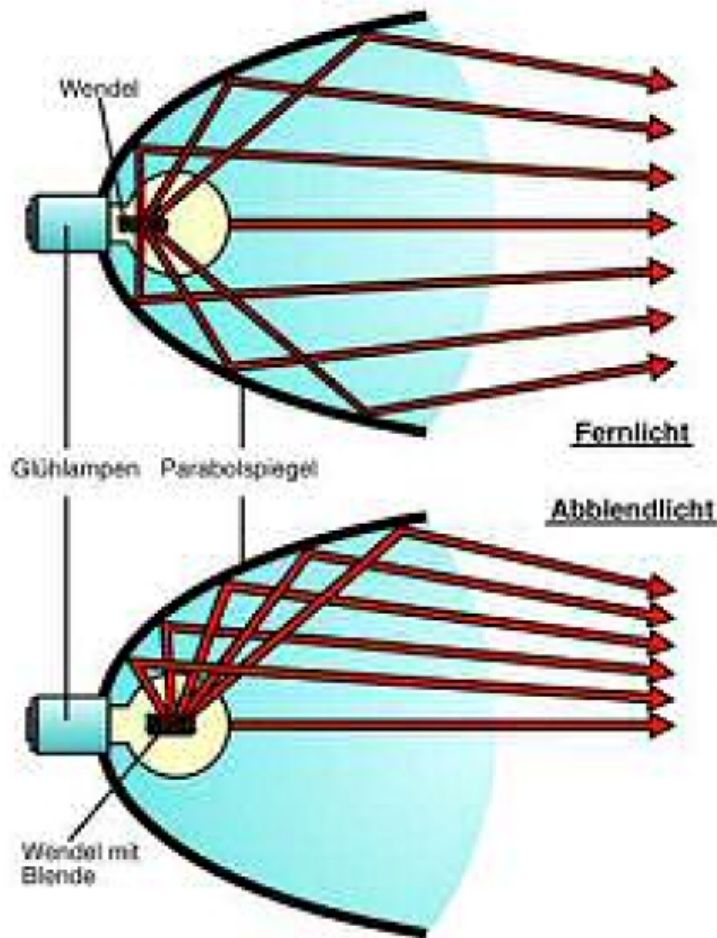


- im Schnittpunkt der verschiedenen von einem Punkt ausgehenden Strahlen entsteht ein **umgekehrtes, reelles Bild**. Reelle Bilder kann man auf Schirmen abbilden
- Die von einem Punkt ausgehenden Strahlen schneiden sich nicht mehr; sie scheinen von einem Punkt auszugehen: es entsteht ein **aufrechtes virtuelles Bild**; virtuelle Bilder sind optische Täuschungen



Anwendungen Parabolspiegel

Abblend – und Fernlicht:



Parabolantenne:



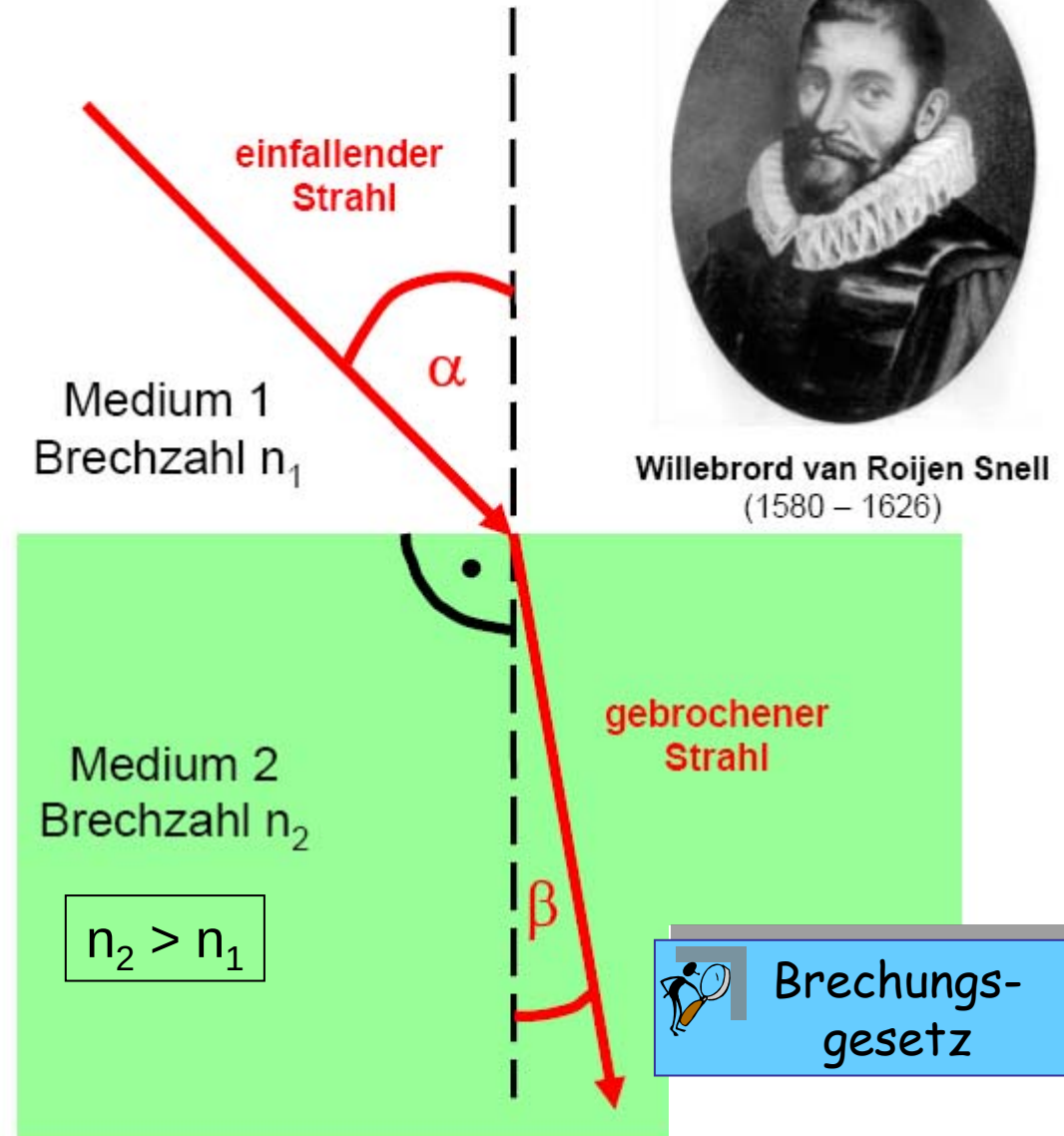
- die vom Satelliten emittierten elektromagnetischen Wellen werden im Empfänger im Brennpunkt fokussiert

Brechungsgesetz von Snellius

Brechungsgesetz:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

- beim Übergang vom optisch dünneren ins optisch dichtere Medium ($n_2 > n_1$) wird der Lichtstrahl zum Lot hingebrochen: $\alpha > \beta$
- beim Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium ($n_1 > n_2$) wird der Lichtstrahl vom Lot weggebrochen: $\alpha < \beta$



Brechungsgesetz

Beispiel 1:

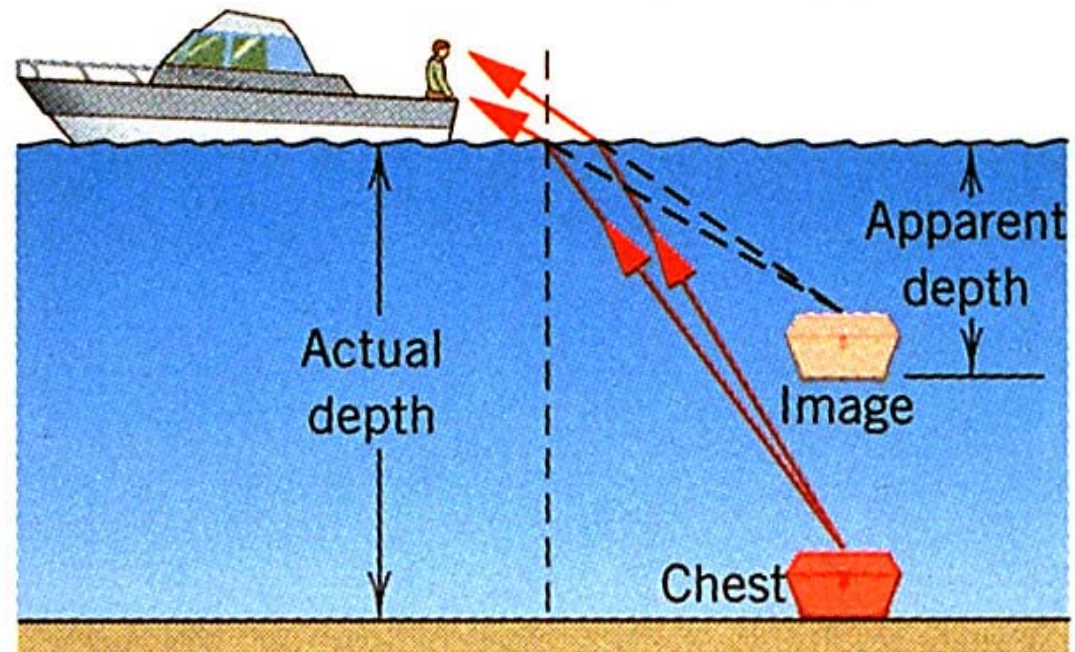
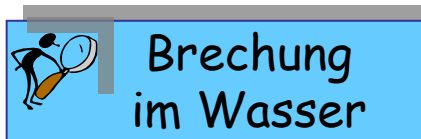
- Ein Lichtstrahl fällt unter einem Winkel von 45° auf die Grenzfläche zwischen Luft und Wasser ($n=1,33$)

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

$$1,00 \cdot \sin 45^\circ = 1,33 \cdot \sin \beta \Rightarrow \sin \beta = \frac{\sin 45^\circ}{1,33} = 0,53 \Rightarrow \beta = 32^\circ$$

Beispiel 2:

- beim Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium wird der Lichtstrahl vom Lot weggebrochen:



Totalreflexion

- beim Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium wird der Lichtstrahl für Einfallswinkel $\alpha > \alpha_g$ **total reflektiert**; d.h. der Lichtstrahl kann das optisch dichtere Medium nicht verlassen:

Grenzwinkel α_g für $\beta = 90^\circ$

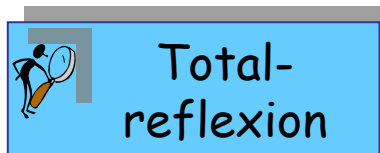
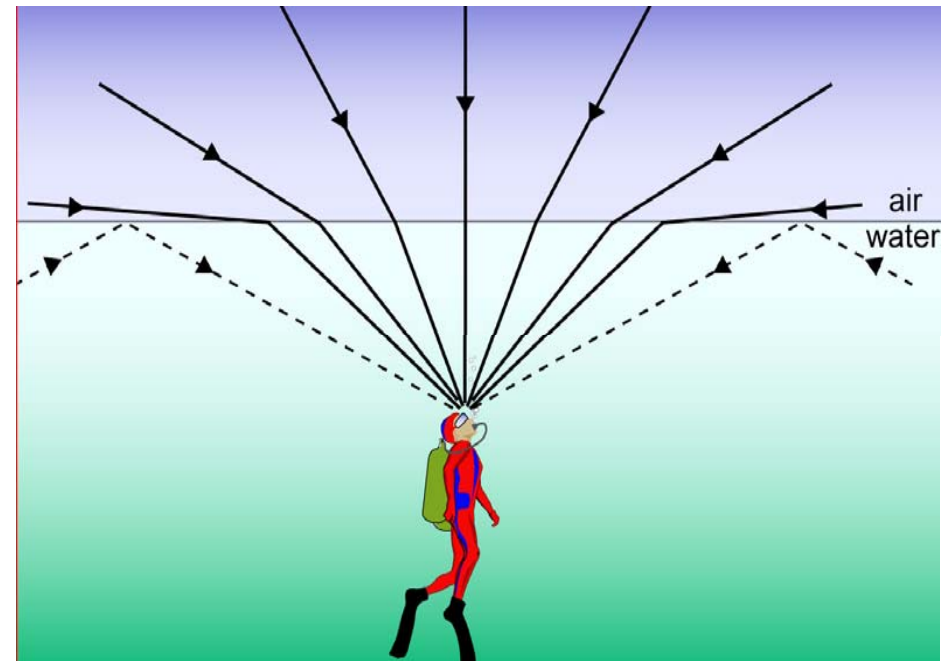
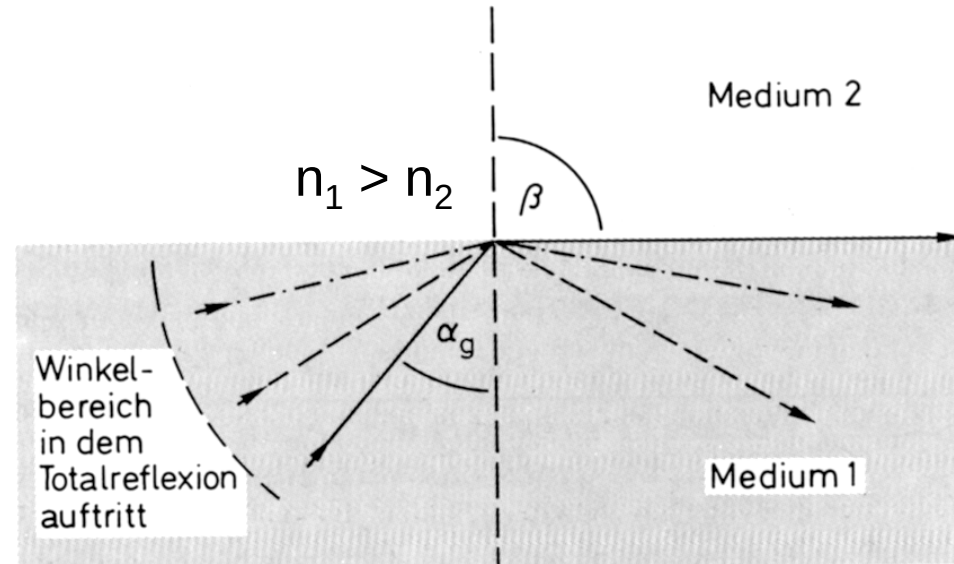
$$n_1 \cdot \sin \alpha_g = n_2 \cdot \underbrace{\sin 90^\circ}_{1,0}$$

$$\Rightarrow \sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1}$$

Beispiele:

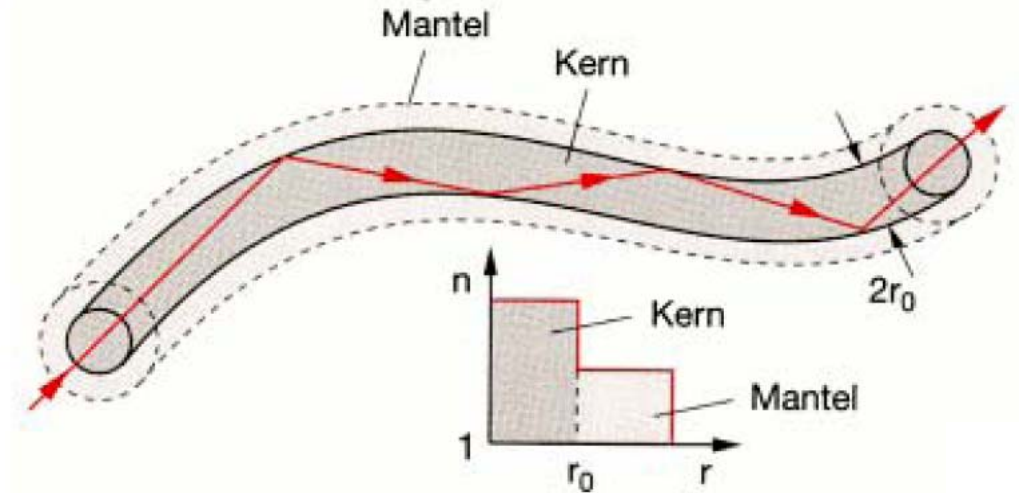
Wasser ($n=1,33$) – Luft: $\alpha_g = 48,6^\circ$

Kronglas ($n=1,5$) – Luft: $\alpha_g = 41,8^\circ$



Anwendung Totalreflexion: Lichtleiter

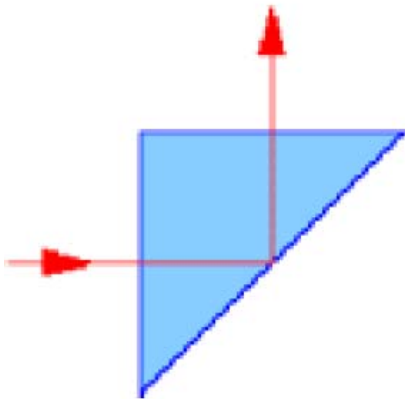
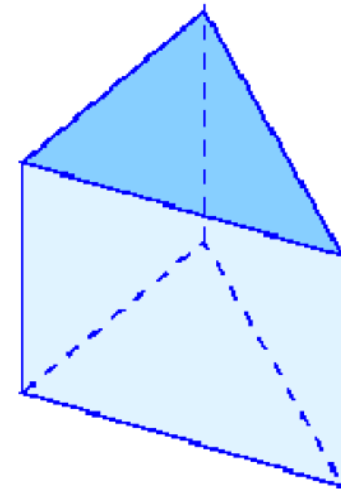
- **Lichtleiter**= doppelwandige Faser mit höherer Brechzahl im zylindrischen Kern als im äußeren Mantel
- **medizinische Anwendungen:**
 - Beleuchtung von Körperhöhlen
 - Zuführung von UV-Licht zum **Aushärten** von Zahnfüllungen
 - **Fotokoagulation**: Zuführung intensiver Laserpulse im chirurgischen Bereich
 - **Endoskopie**: Übertragung von Bildern (Punktraster) mittels Lichtleiterbündeln



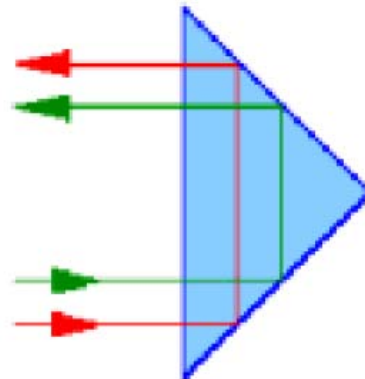
Lichtleiter

Prismen

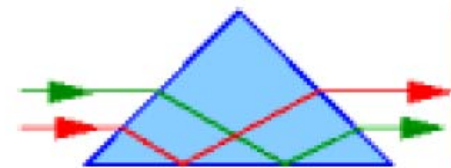
- **Prisma** = Glaskeil mit ebenen Außenflächen
- häufigste Prismenformen:
 - **90° Prisma**: symmetrisches Prisma mit einem Kantenwinkel von 90°
 - **60° Prisma**: symmetrisches Prisma mit einem Kantenwinkel von 60°
- Strahlmanipulationen mit 90° Prismen:
innere Reflexionen = Totalreflexionen



Umlenkungsprisma



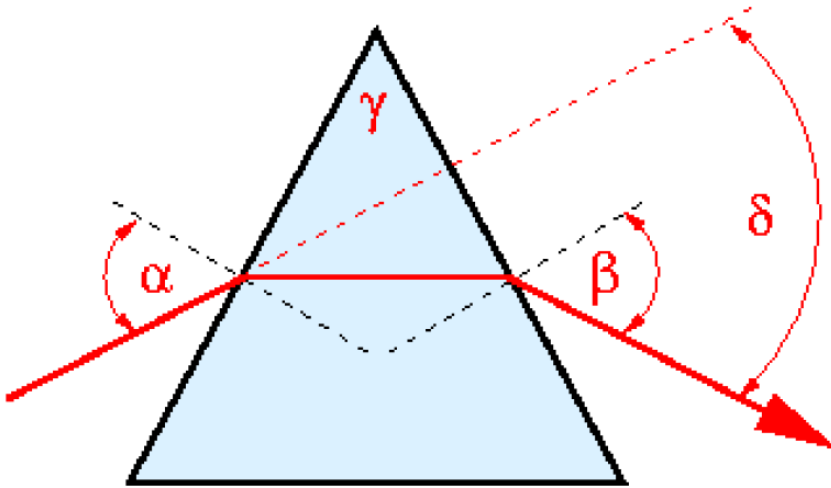
Umkehrprisma



Wendeprisma



Brechung beim 60° Prisma



Brechindizes n und Lichtgeschwindigkeit $c_m = \frac{c_0}{n}$ in Materie

Medium	n	c_m (km s ⁻¹)
Vakuum	1,00	$\approx 300\,000$
Luft	1,00	$\approx 300\,000$
Wasser	1,33	$\approx 225\,000$
Diamant	2,42	$\approx 124\,000$
Auge, Glaskörper	1,34	
technische Gläser	1,4–1,8	

- ein Prisma ($\gamma < 90^\circ$) lenkt einen Einfallsstrahl um den Winkel δ ab
- der Strahl wird beim Durchgang durch das Prisma zweimal gebrochen
- bei symmetrischem Strahlengang ($\alpha = \beta$) wird der Ablenkwinkel δ minimal:

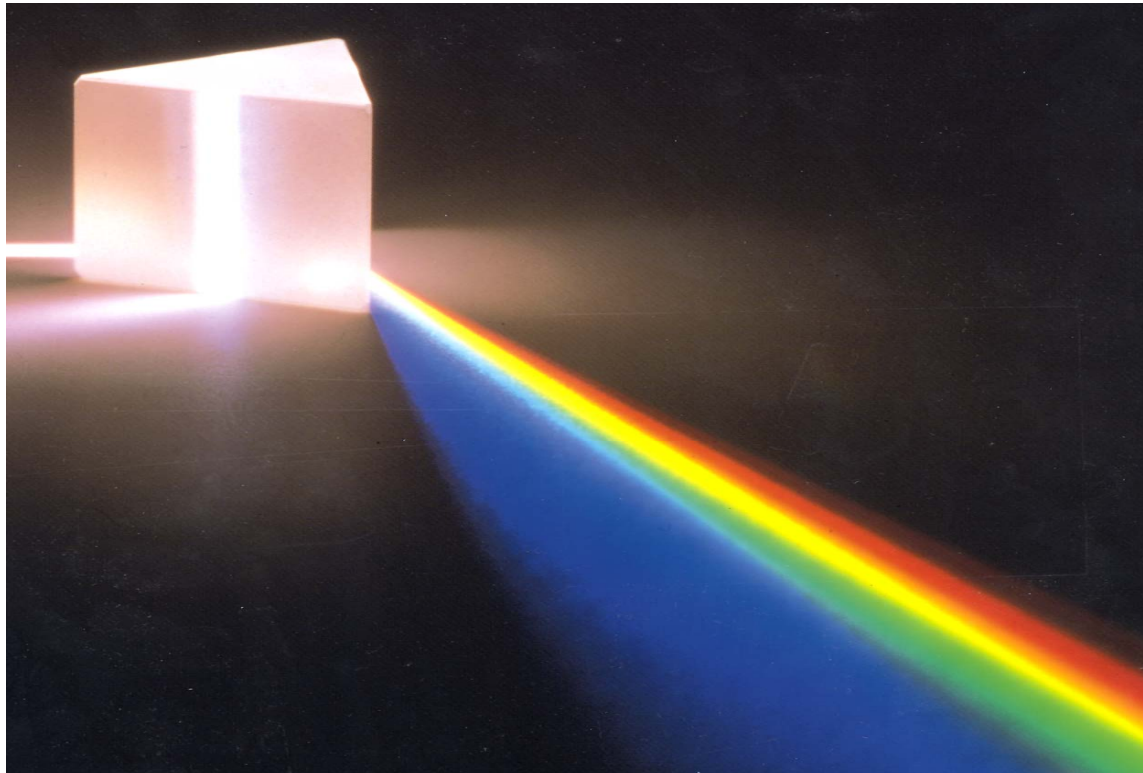
$$\delta \approx (n - 1) \cdot \gamma$$

wobei n der Brechungsindex des Prismenmaterials und das umgebende Medium Luft ist

- Methode zur Bestimmung des Brechungsindex n

Dispersion: spektrale Zerlegung von weißem Licht am Prisma

- weißes Licht ist eine Überlagerung von Licht verschiedener Wellenlängen
- **Dispersion**: der Brechungsindex hängt von der Wellenlänge ab: $n = n(\lambda)$;
⇒ Licht unterschiedlicher Wellenlänge wird verschieden stark gebrochen



700nm

550nm

400nm



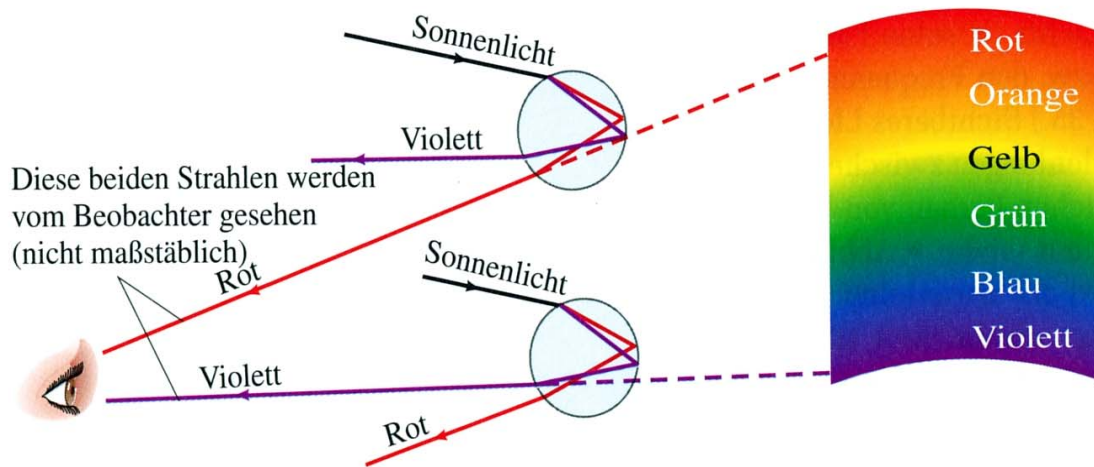
Wellencharakter des Lichts !!

bei normaler Dispersion
wird kurzwelliges (blaues)
Licht stärker gebrochen
als langwelliges (rotes)
Licht



Regenbogen

- Dispersion in Wassertropfen:
Beobachtung fallender Wassertropfen mit der Sonne im Rücken

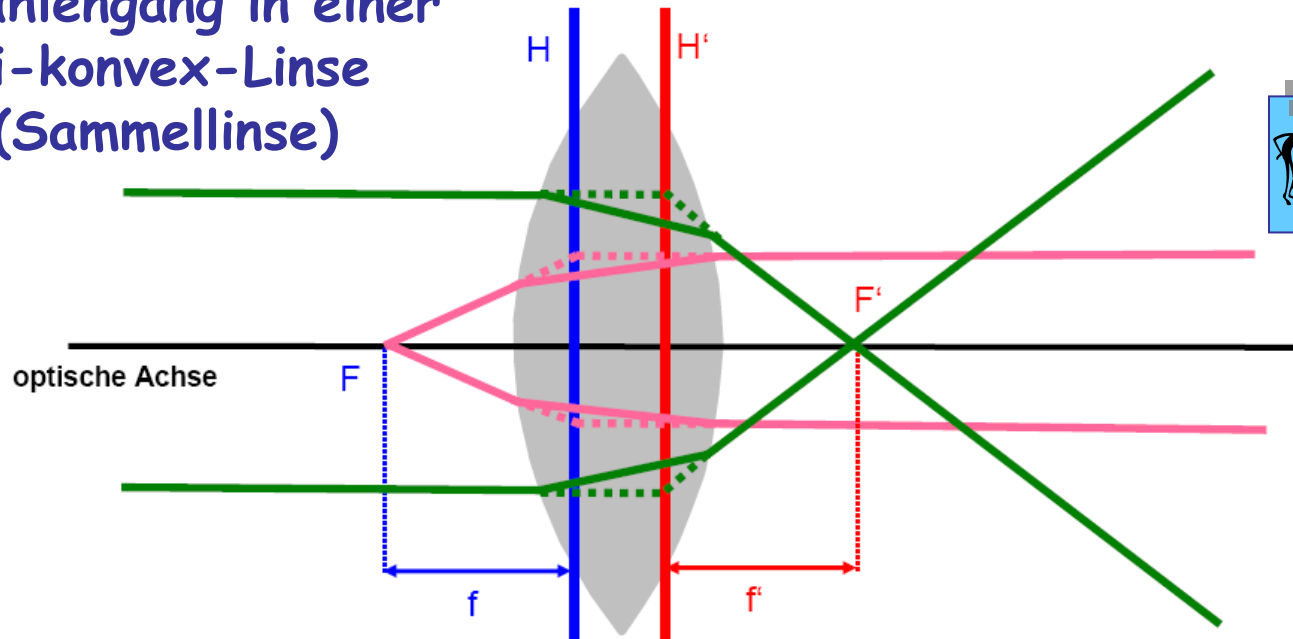


- Sonnenlicht wird in Wassertropfen gebrochen und spektral zerlegt; Totalreflexion an der Rückseite der Wassertropfen. Rot wird am wenigsten abgelenkt. Der Beobachter sieht daher rotes Licht von den höheren Wassertropfen und violett Licht von niedrigeren Wassertropfen $\Rightarrow$ Oberkante des Regenbogens ist rot

Linsen

- **Linsen:** Kombination von zwei brechenden Grenzschichten

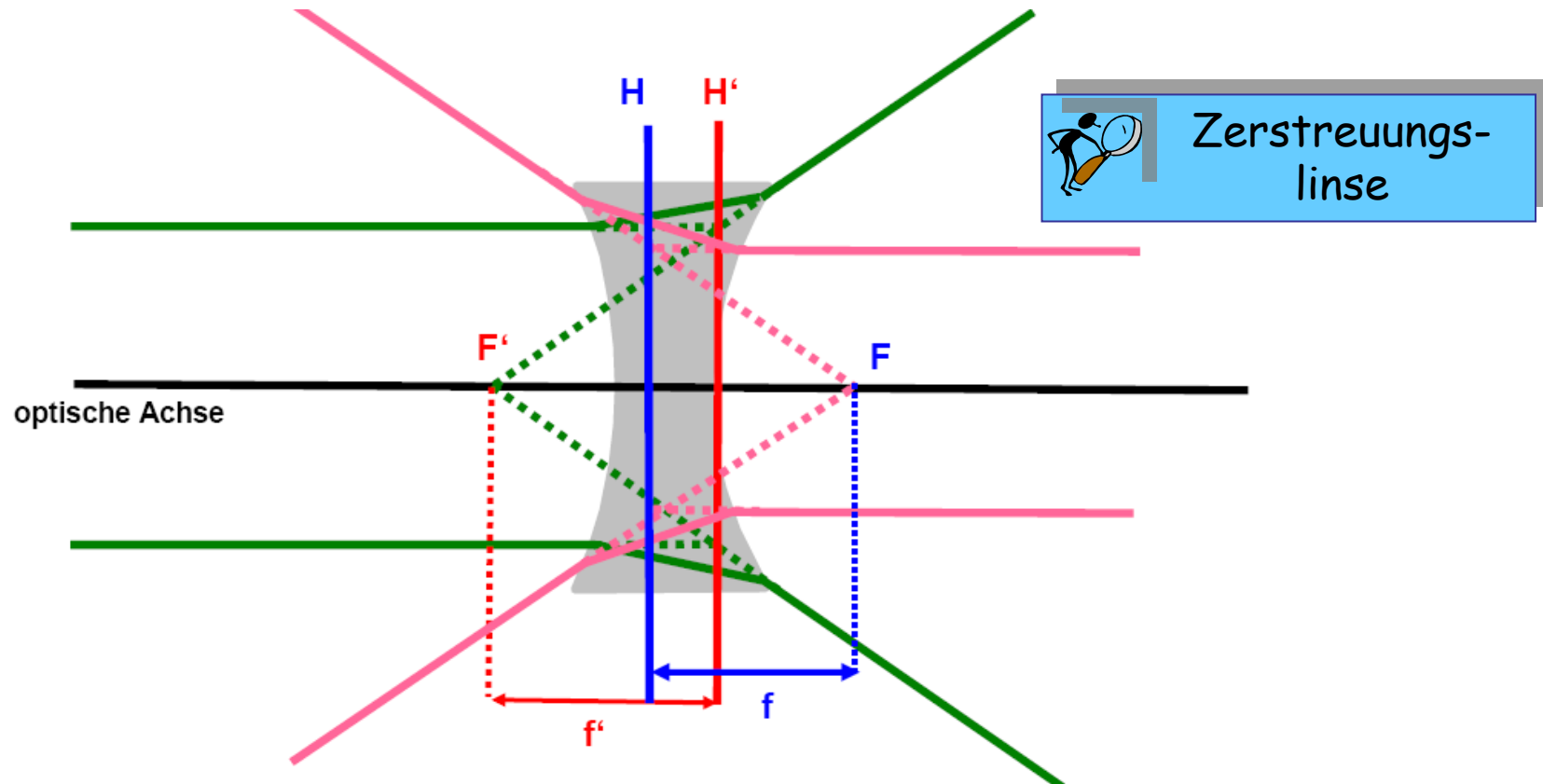
Strahlengang in einer bi-konvex-Linse (Sammellinse)



- Licht wird beim Durchgang durch die Linse zweimal gebrochen ($n_{\text{Linse}} > n_{\text{Luft}}$)
- Konstruktion des Strahlengangs vereinfacht mittels **Hauptebenen**
 - paralleler Lichtstrahl läuft bis zur Hauptebene H' und wird dann zum Brennpunkt gebrochen (gestrichelt gezeichnet)
 - Brennpunktstrahl läuft bis Hauptebene H , wird dort gebrochen und läuft dann parallel zur optischen Achse
 - zwischen den Hauptebenen Strahlen parallel zur optischen Achse

Strahlengang bei Zerstreuungslinse

Strahlengang in einer bi-konkav-Linse (Zerstreuungslinse)



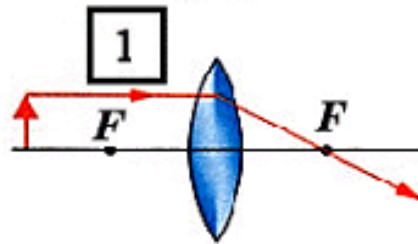
- einfallendes paralleles Lichtbündel wird aufgestreut
- auch bei **Zerstreuungslinse** Konstruktion des Strahlengangs vereinfacht durch Einführung hypothetischer **Hauptebenen**

Dünne Linsen

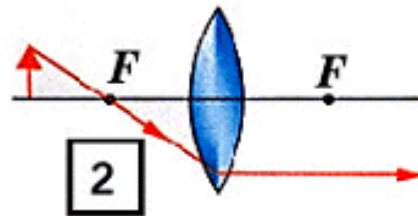
- bei Vernachlässigung der Dicke (Abstand der Hauptebenen voneinander klein gegen die Brennweite) fallen beide Hauptebenen zusammen
⇒ Vereinfachung des Strahlengangs

Sammellinse

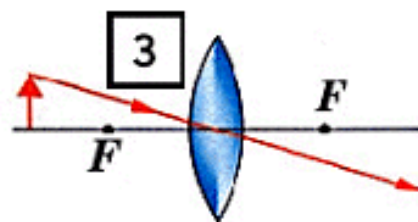
1. Parallelstrahl nach Linse durch Brennpunkt



2. Brennpunktstrahl nach Linse achsenparallel

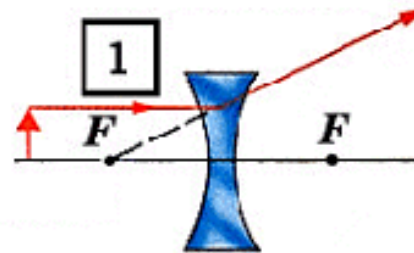


3. Zentralstrahl wird nicht gebrochen

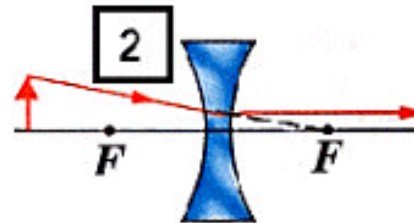


Zerstreuungslinse

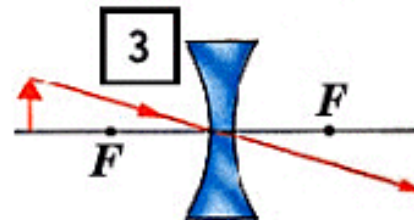
1. Parallelstrahl nach Linse so, als ginge er vom Brennpunkt aus



2. Brennpunktstrahl nach Linse achsenparallel

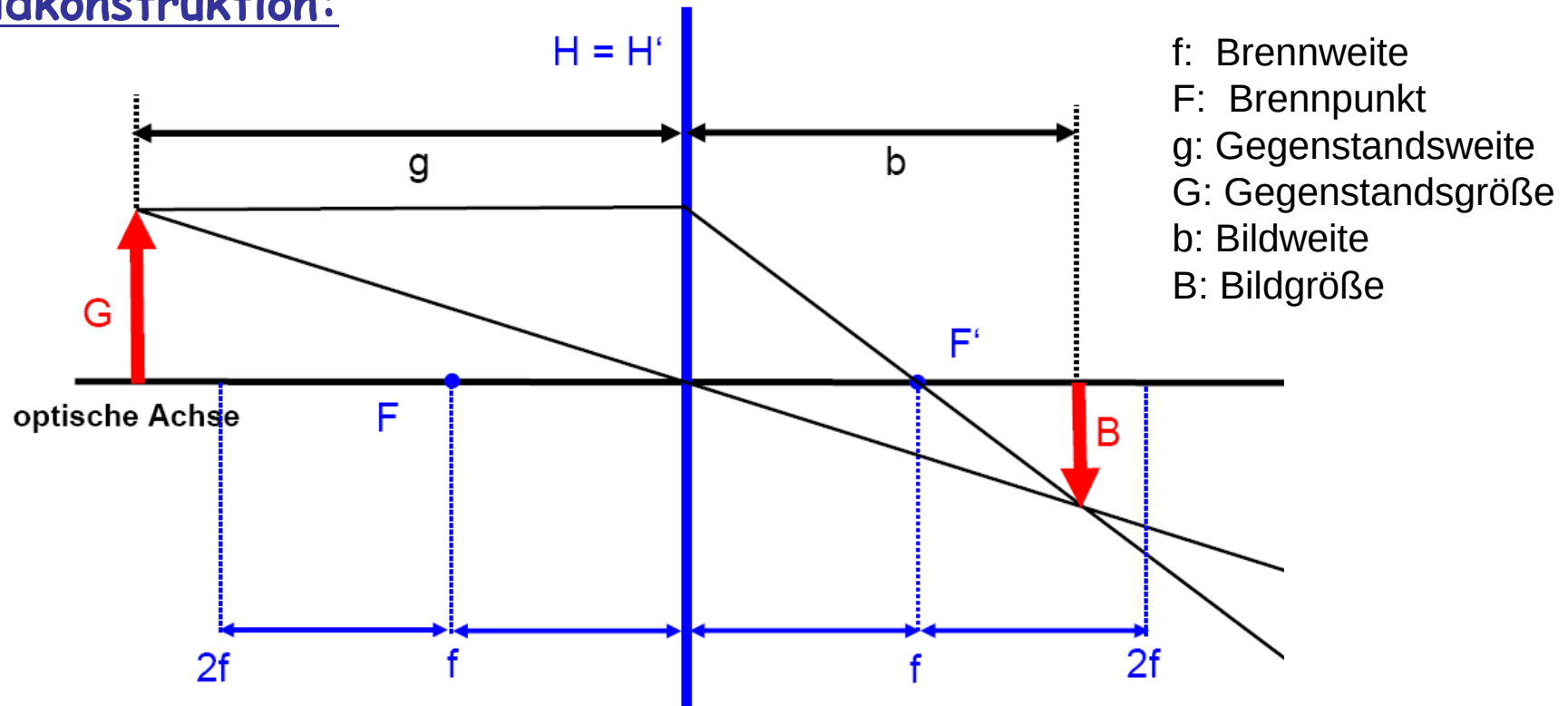


3. Zentralstrahl wird nicht gebrochen



Linsengleichung

Bildkonstruktion:



Linsen-
gleichung

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

Abbildungs-
maßstab

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

- die Linsengleichung gilt für reelle und virtuelle Bilder bei Sammell- und Zerstreuungslinsen (bei Zerstreuungslinse Brennweite $f = f' < 0$)



Linsengleichung

Linse Gleichung

Beispiel:

Ein Gegenstand ($G=1\text{ cm}$) befindet sich in 15 cm Abstand von einer Sammellinse mit einer Brennweite von 10 cm .

a.) In welcher Entfernung von der Linse befindet sich das Bild ?

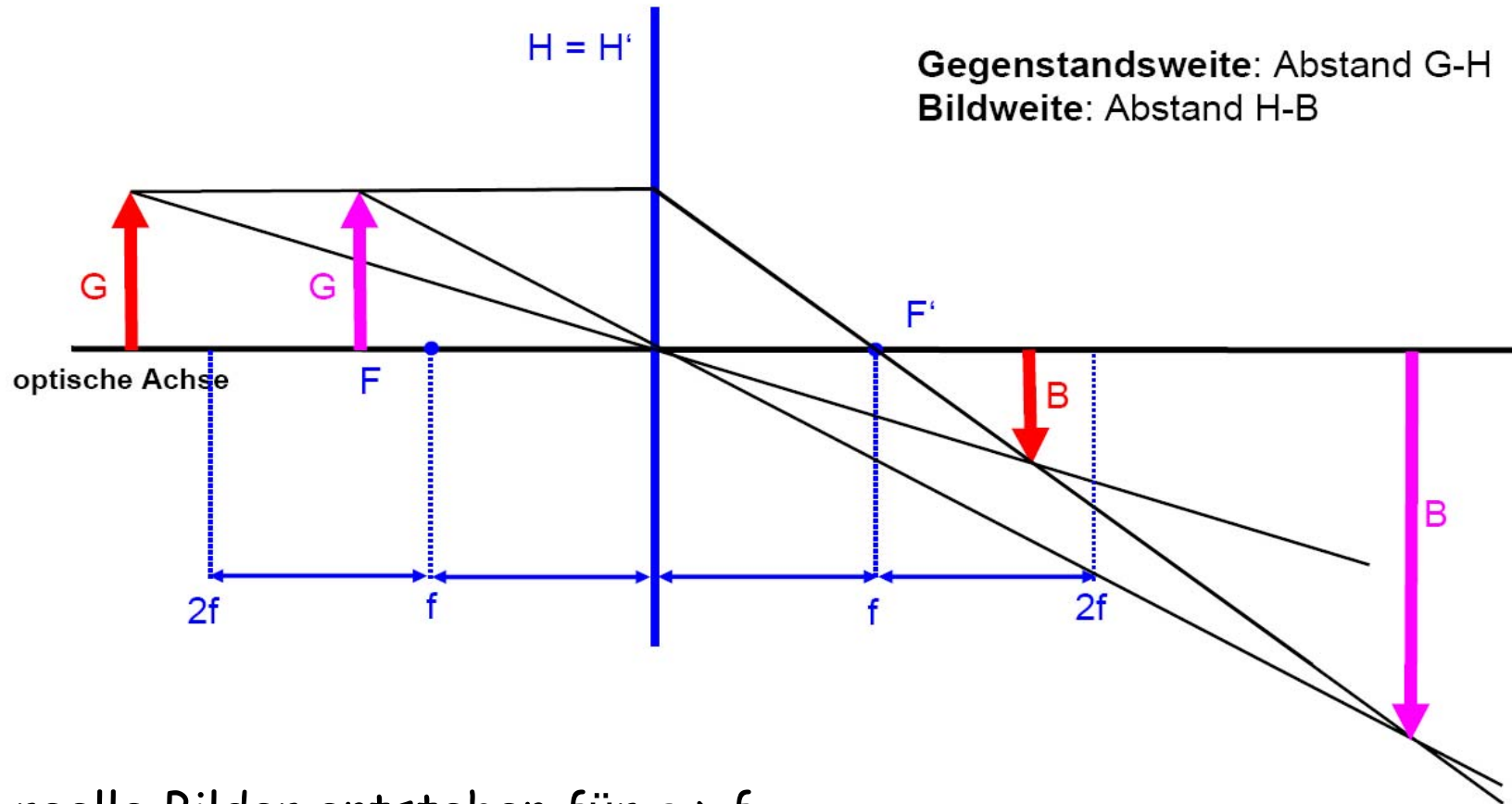
b.) Wie groß ist das Bild ?

$$\text{a.) } \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{g} \quad \Rightarrow \quad b = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{g}} = \frac{1}{\frac{g-f}{g \cdot f}} = \frac{g \cdot f}{g-f}$$

$$b = \frac{15\text{ cm} \cdot 10\text{ cm}}{15\text{ cm} - 10\text{ cm}} = \frac{150\text{ cm}^2}{5\text{ cm}} = 30\text{ cm}$$

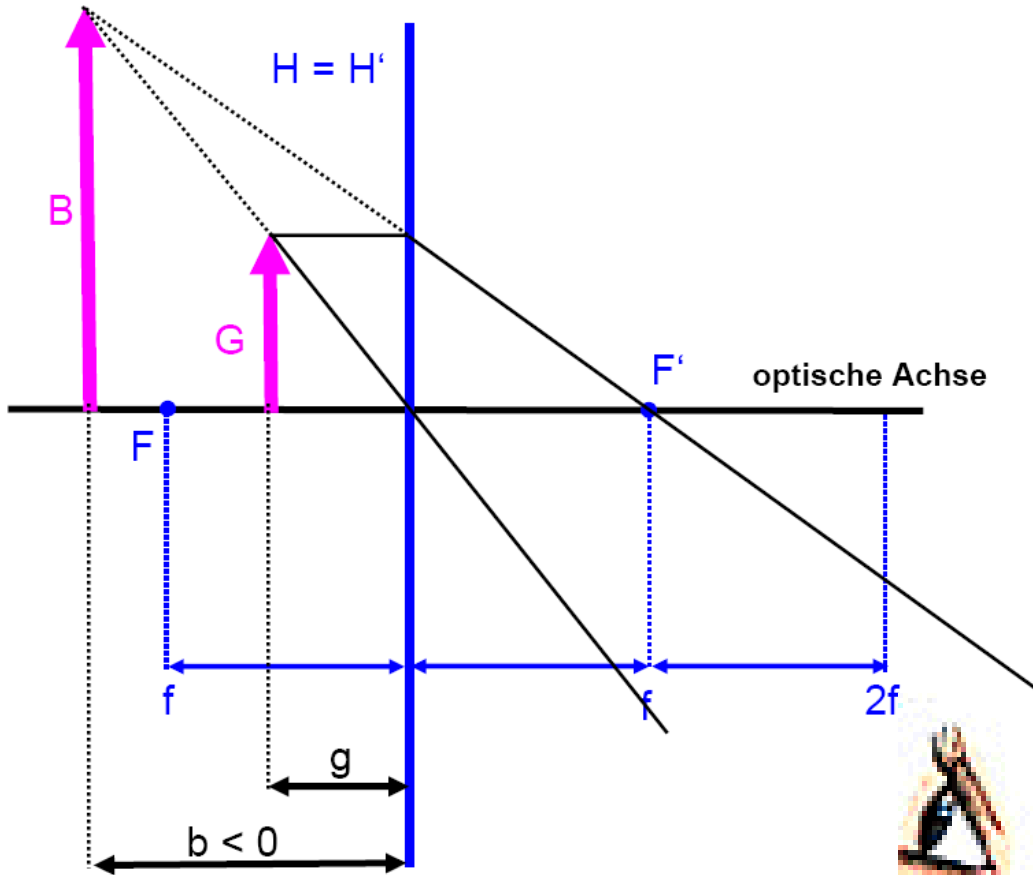
$$\text{b.) } \frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad \Rightarrow \quad B = \frac{b}{g} \cdot G \quad \Rightarrow \quad B = \frac{30\text{ cm}}{15\text{ cm}} \cdot 1\text{ cm} = 2\text{ cm}$$

Reelle Bilder mit dünner Sammellinse



- reelle Bilder entstehen für $g > f$
- **$g > 2f$** : dann $2f > b > f$, $B < G$, d.h. verkleinertes, umgekehrtes reelles Bild
- **$2f > g > f$** : dann $b > 2f$, $B > G$, d.h. vergrößertes, umgekehrtes, reelles Bild
- **$g = 2f$** : dann $b = 2f$, $B = G$, d.h. gleich großes, umgekehrtes reelles Bild

Virtuelles Bild bei Sammellinse (Lupe)



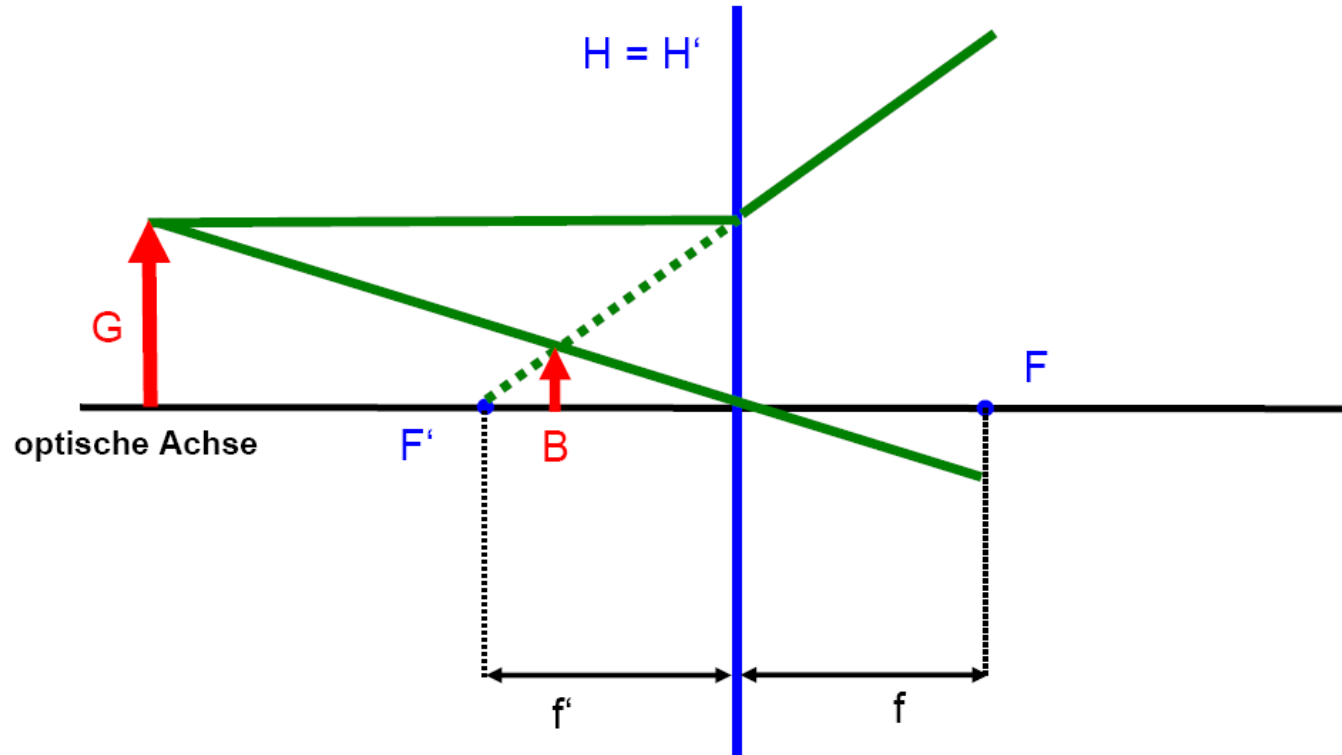
Anwendung: Lupe



Auge

- ausgezeichnete Strahlen schneiden sich nicht im Bildraum
- Verlängerung nach hinten führt zu Schnittpunkt; dort kein Licht, aber Licht auf Bildseite scheint von dort zu kommen, d.h. **virtuelles Bild**
- vergrößertes, aufrechtes virtuelles Bild für $0 < g < f$
- Konvention: $b < 0$, da auf Gegenstandsseite

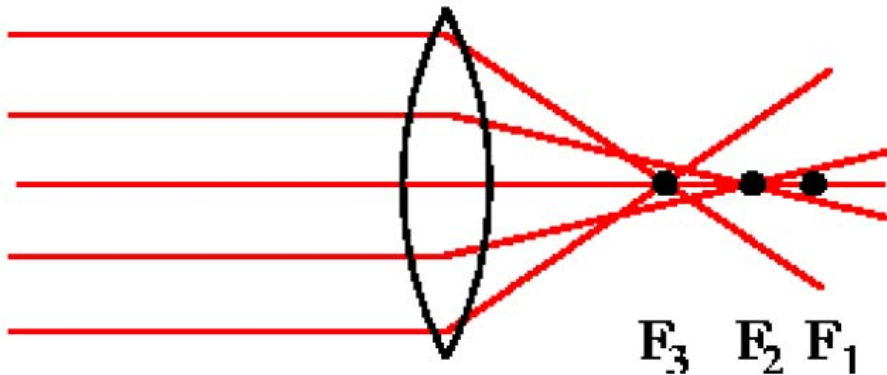
Virtuelles Bild bei Zerstreuungslinse



- ausgezeichnete Strahlen schneiden sich nicht im Bildraum
- Zentralstrahl und rückwärtige Verlängerung des Parallelstrahls im Bildraum schneiden sich im Bildpunkt. Für einen Betrachter auf der Bildseite scheint das Licht von dort zu kommen: **virtuelles Bild**
- verkleinertes aufrechtes virtuelles Bild für $g > 0$
- Konvention: $b < 0$, da auf Gegenstandsseite

Linsenfehler

Sphärische Aberration:

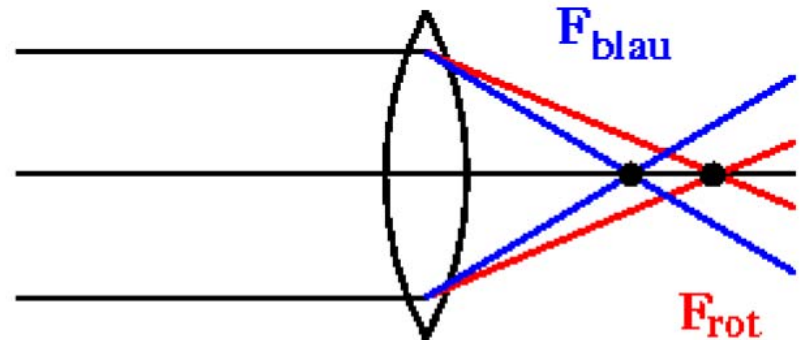


- achsennahe und achsenferne Parallelstrahlen werden in unterschiedlichen Brennpunkten fokussiert



sphärische
Aberration

Chromatische Aberration:

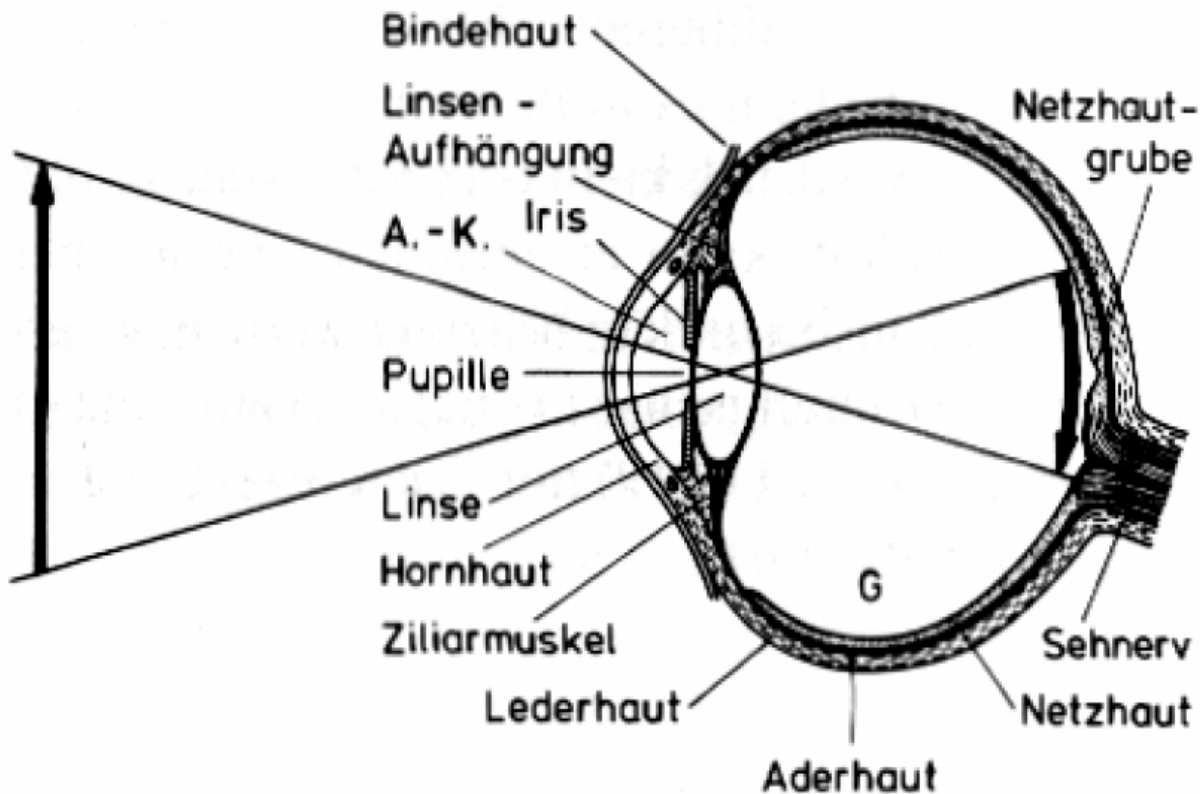


- aufgrund der Dispersion $n = n(\lambda)$ variiert die Brennweite mit der Wellenlänge des Lichts. Bei normaler Dispersion ist die Brennweite für blaues Licht kürzer als für rotes Licht



chromatische
Aberration

Das Auge



Prinzipieller Aufbau:

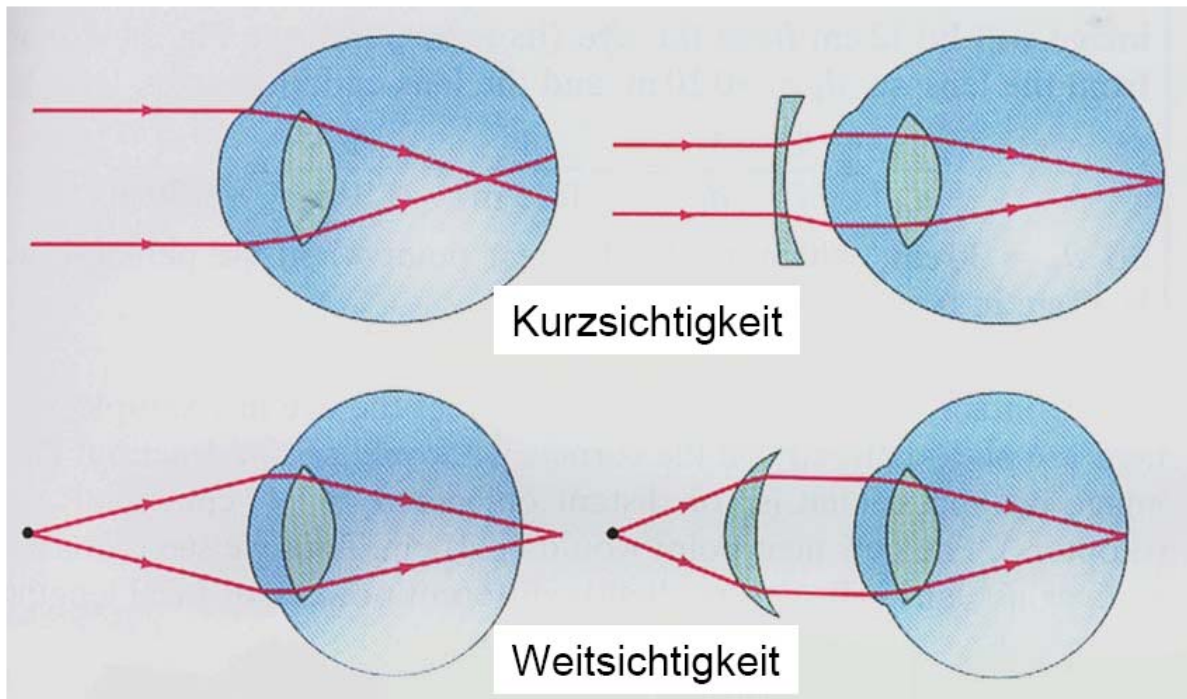
- Hornhaut
- vordere Augenkammer mit Kammerwasser
- Augenlinse
- Glaskörper (gallertartige Masse)
- Netzhaut

- Brechkraft der Linse lässt sich durch Ziliarmuskel verändern
- Brennweite vor und nach der Augenlinse sind unterschiedlich wegen der verschiedenen Brechzahlen von Luft und Glaskörper

Linsensysteme: Kurz- und Weitsichtigkeit

- **Brechkraft** einer Linse = Kehrwert der Brennweite
Einheit: Dioptrie $1\text{dpt} = 1/\text{m}$
d.h. Brille mit 3 Dioptrien $\Rightarrow$ Brennweite = 33 cm
- **Linsensysteme:**
bei Kombination von Linsen addieren sich die Brechkräfte der Linsen

Beispiel:



Kurzsichtigkeit:

Brechkraft des Auges zu groß; kompensiert durch zusätzliche Zerstreuungslinse

Weitsichtigkeit:

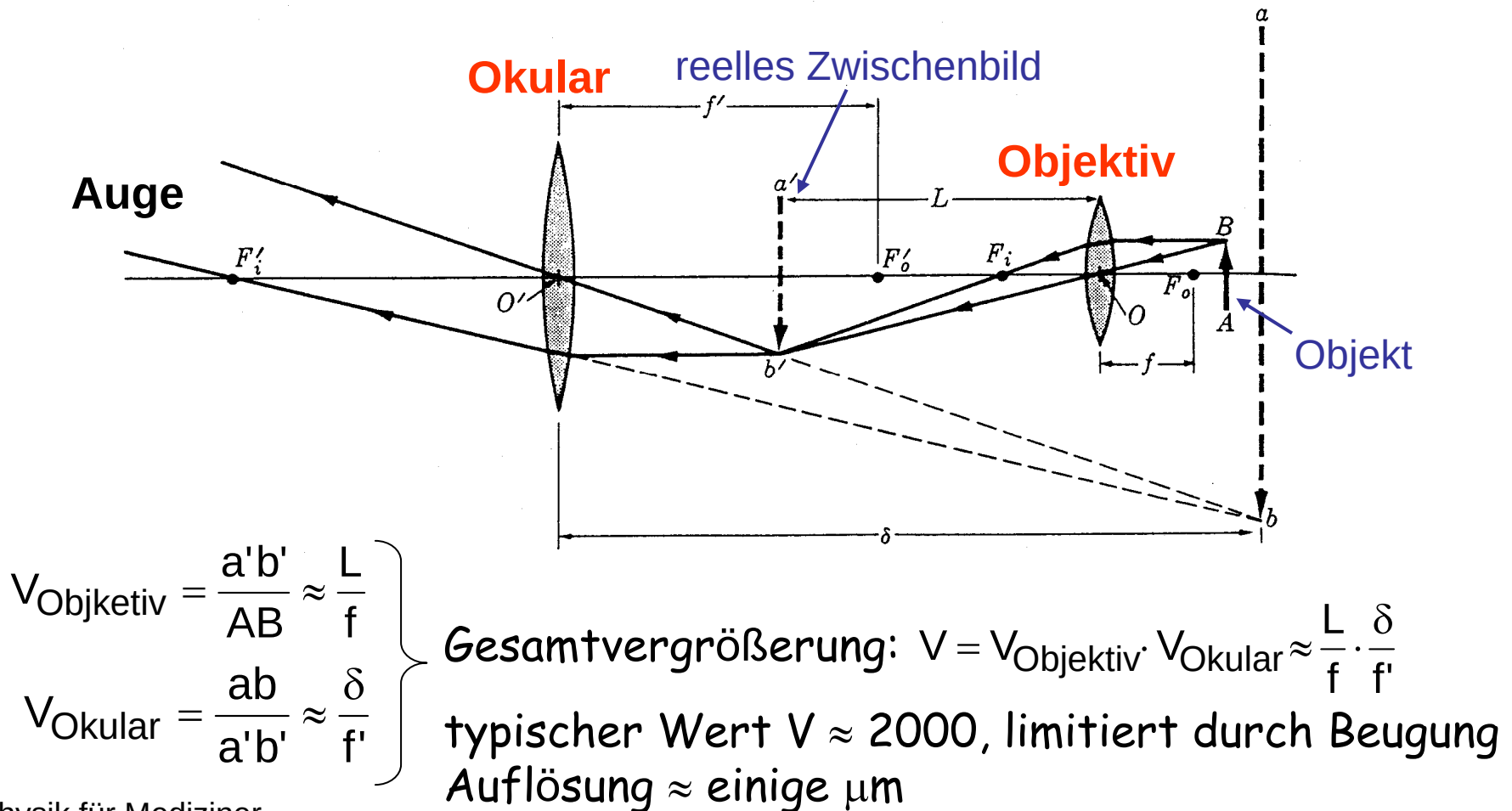
Brechkraft des Auges zu klein; kompensiert durch zusätzliche Sammellinse

Mikroskop

Mikroskop: Linsensystem aus zwei Sammellinsen: **Objektiv** und **Okular**
Objektiv erzeugt reelles Zwischenbild innerhalb der Brennweite des Okulars; Auge schaut sich das reelle Zwischenbild mit Lupe (Okular) an.

Objektiv: Brennweite f ; Okular: Brennweite f'

Abstand Objektiv - Okular $> f, f'$

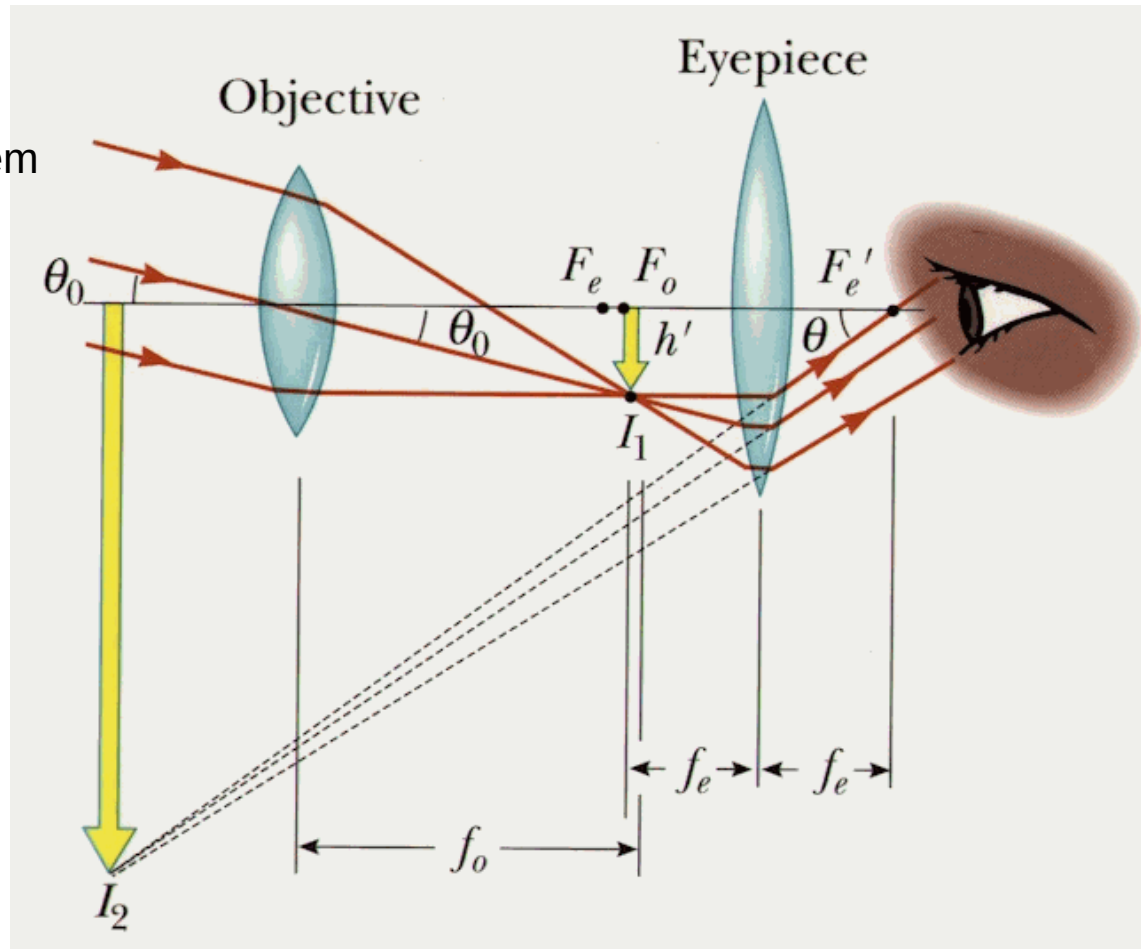


Fernrohr

Fernrohr: System aus zwei Sammellinsen (Objektiv, Okular)

Objektiv erzeugt verkleinertes reelles Zwischenbild innerhalb der Brennweite des Okulars; Auge schaut sich das reelle Zwischenbild mit Lupe (Okular) an: vergrößertes virtuelles Bild

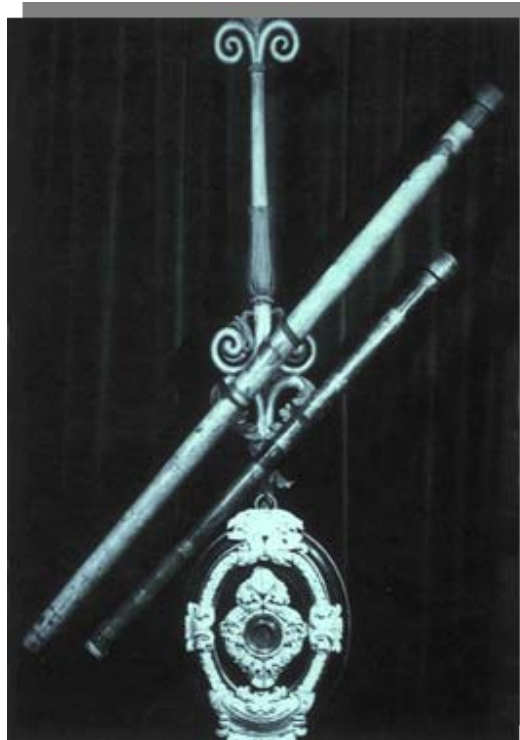
Parallel-
strahlen
von fernem
Objekt



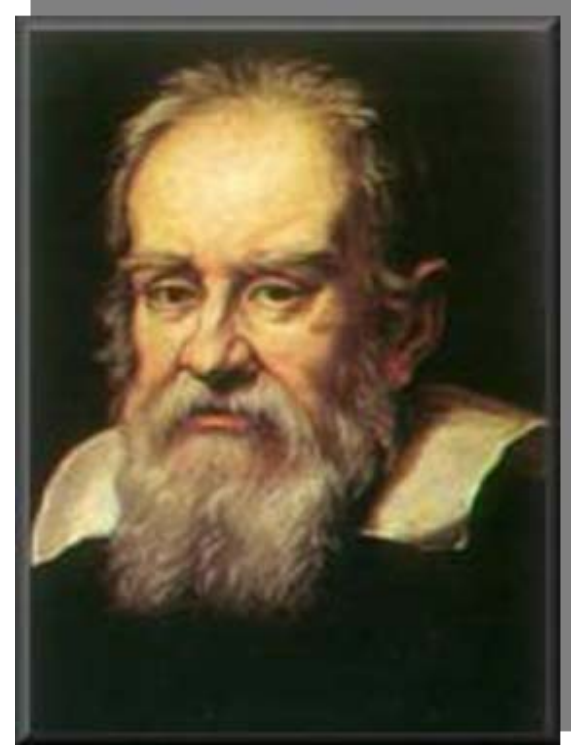
Mikroskop, Fernrohr



Mikroskop



Fernrohr



Galileo Galilei
1564 - 1642

Zusammenfassung

- **Geometrische Optik = Strahlenoptik**
gute Näherung, wenn charakteristische Längen $\gg$ Wellenlänge des Lichts
- an der Grenzfläche zwischen zwei Medien treten **Reflexion** und **Brechung** auf; beim Übergang vom optische dichteren ins optische dünnere Medium kann **Totalreflexion** auftreten
- **Prismen** und **Linsen** nutzen das Phänomen der **Brechung** aus
- Die **Dispersion** (Wellenlängenabhängigkeit) des Brechungsindex in Prismen kann zur spektralen Zerlegung von weißem Licht genutzt werden.
- eine Linse ist charakterisiert durch ihre **Hauptebenen** und **Brennpunkte**; geometrische Bildkonstruktion
- **optische Systeme** (Brille, Mikroskop, Fernrohr) sind mit wenigen Linsen realisierbar; komplexere Linsensysteme zur Korrektur von Abbildungsfehlern)