

Übersicht gkg ... pharm. Prüf.

Einführung

1 Allgemeines

2 Mechanik

3 Wärmelehre

4 Elektrizität und Magnetismus

5 Optik

6 Schwingungen und Wellen

7 Atomistische Struktur der Materie

(8 Grundlagen der Arzneiformenlehre)

5.1 aus gkg ... pharm. Prüf.

5 Optik 5.1 Allgemeine Eigenschaften des Lichtes

5.1.1 Modellvorstellungen: Wellen- und Korpuskular-Beschreibung des Lichtes

5.1.2 Lichtgeschwindigkeit: Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wert für Vakuum; Zusammenhang mit der Brechzahl der Materie; Zusammenhang von Ausbreitungsgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge; Abhängigkeit dieser Größen vom Medium; Definition der Wellenzahl

5.1.3 Spektralbereiche: Spektrum elektromagnetischer Strahlung, sichtbarer Spektralbereich, ungefähre Wellenlängen

5.1.4 Quantenstrahlung: Zusammenhang von Quantenenergie und Frequenz; Photoeffekt (Grundzüge); Ionisation (Grundzüge)

5.1.5 Lambert-Beer'sches Gesetz (s.a. PhAna 12.7.3)

Quantitativ; Absorption [gemäß Arzneibuch $A = I_0 - I$], Abhängigkeit von Schichtdicke und Konzentration; Halbwertdicke; Begriff der Transmission

5.1.6 Quadratisches Abstandsgesetz: Abnahme der Strahlungsflussdichte mit wachsendem Abstand von einer punktförmigen Quelle

5.2 aus gkg ... pharm. Prüf.

5.2 Geometrische Optik

5.2.1 Lichtbündel: Parallelbündel, Erzeugung mittels Blende und Linse; divergentes und konvergentes Bündel

5.2.2 Reflexion und Brechung: Reflexionsgesetz, geometrische Zusammenhänge; Brechungsgesetz, Brechzahl (Messung s. PhAna 12.2.1); Dispersion; Totalreflexion, Bedingungen des Auftretens, z.B. Lichtleiter

5.2.3 Spiegel: Abbildung am ebenen Spiegel und am sphärischen Hohlspiegel

5.2.4 Linsen: Sammell- und Zerstreuungslinsen, Abbildung mit (dünnen) Linsen, Bildkonstruktion, Abbildungsformel, Verhältnis Bildgröße zu Gegenstandsgröße; Linsensysteme aus zwei dicht zusammengefügt dünnen Linsen; Brechwert und Brennweite

5.3 aus gkg ... pharm. Prüf.

5.3 Optische Einrichtungen und Systeme

5.3.1 Vergrößerung: Winkelvergrößerung, Sehwinkel, (konventionelle) deutliche Sehweite

5.3.2 Lupe: Strahlengang, Vergrößerung

5.3.3 Lichtmikroskop: Funktion des Objektivs und des Okulars, Zusammenhang von Vergrößerung und Brennweiten von Objektiv und Okular; Okularmikrometer, Eichung mittels Objektmikrometer; Auflösungsvermögen, qualitative Abhängigkeit von Wellenlänge, Apertur und Immersionsflüssigkeit

5.3.4 Spektralapparat (s.a. PhAna 12.5.2): Prismen- und Gitterspektrometer, Aufbau und Strahlengang (s.a. 5.3.5); Handhabung für die Spektralanalyse (Eichung, Vergleichsmessungen)

5.3.5 Monochromatoren: Spektralfilter; Prismen- und Gittergeräte (vereinfachtes Schema) für ultraviolettes, sichtbares und infrarotes Licht (s.a. 5.1.3, 5.3.4)

5.4 aus gkg ... pharm. Prüf.

5.4 Polarisation des Lichtes

5.4.1 Grundlagen: Unpolarisiertes und linear polarisiertes Licht, Unterschied, Beispiele

5.4.2 Polarisationseffekte: Brechung und Reflexion, Brewster'sches Gesetz; Grundzüge von Dichroismus, Streupolarisation und Doppelbrechung; Anwendung von Polarisationsfolien

5.4.3 Optische Drehung (s.a. PhAna 12.3): Abhängigkeit zwischen Drehung der Polarisationsebene sowie Konzentration des Stoffes, Art des Lösungsmittels, Temperatur, Lichtweglänge und Wellenlänge des Lichtes (Rotationsdispersion)

5.4.4 Polarimeter (s.a. PhAna 12.3.1): Einfache Polarimeter, Aufbau und Wirkungsweise; Halbschattenapparat, Aufbau und Arbeitsweise

Licht

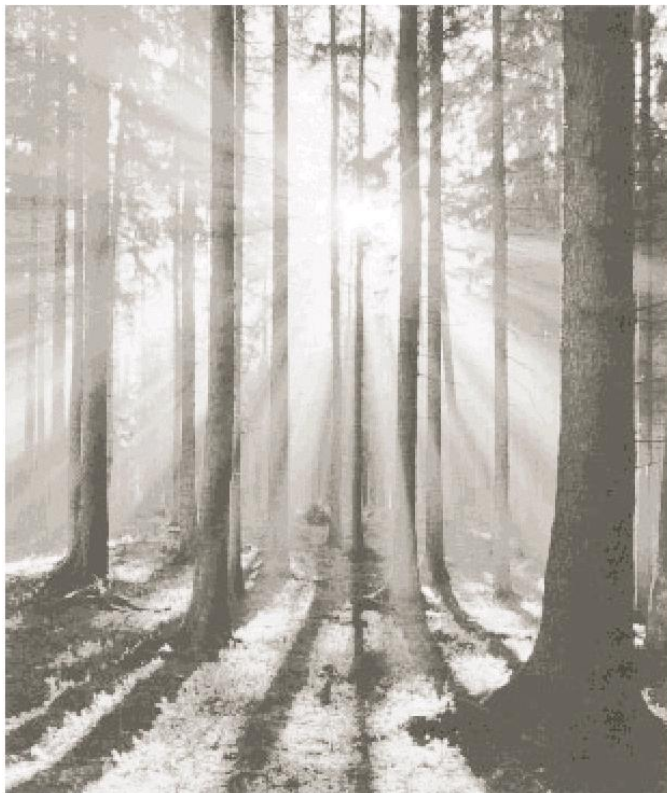
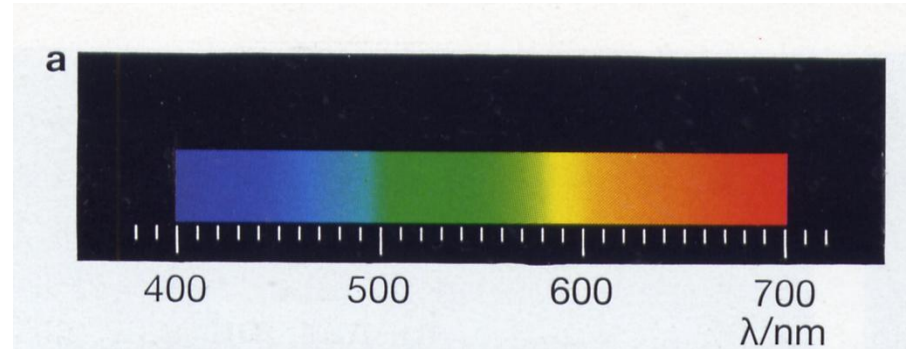
Licht ist elektromagnetische Welle.

sichtbares Licht:

Wellenlänge λ von etwa 0,4 bis 0,7 μm
(=400 bis 700 nm)

Frequenz f von etwa 4 bis $8 \cdot 10^{14}$ Hz

Die genauen Buchangaben schwanken!



$$c = f \cdot \lambda$$

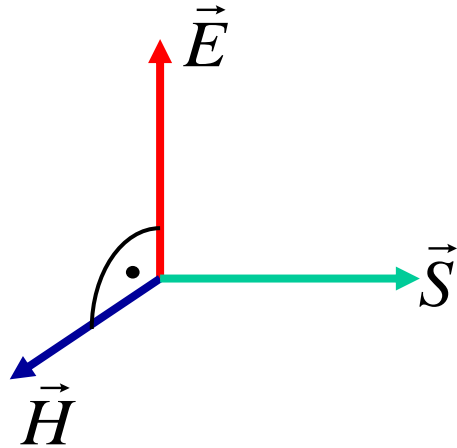
$$= 2.997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\approx 300\,000 \text{ km/s}$$

Lichtstrahlen breiten sich
geradlinig aus!

Wirklich?

Energetische Größen

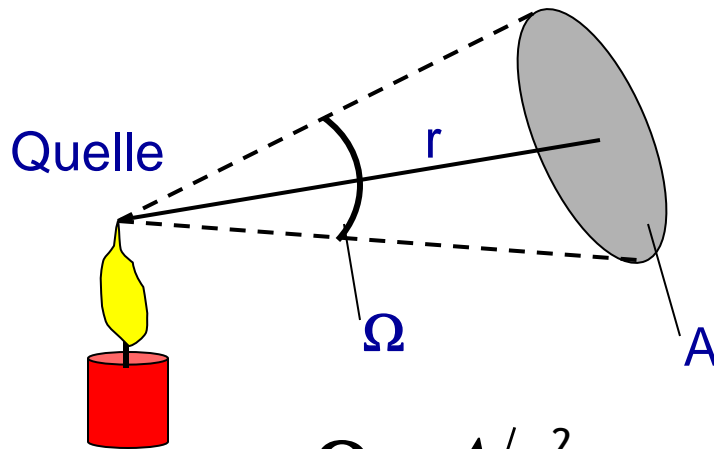


$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Energiestromdichte
(Poynting-Vektor)

$$|\vec{S}| = c \cdot \varepsilon$$

ε : Energiedichte
in J/m³



$$\Omega = A/r^2$$

Raumwinkel

Strahlungsfluß Φ : der pro Sekunde in den Raum abgestrahlte Energiestrom (Watt)

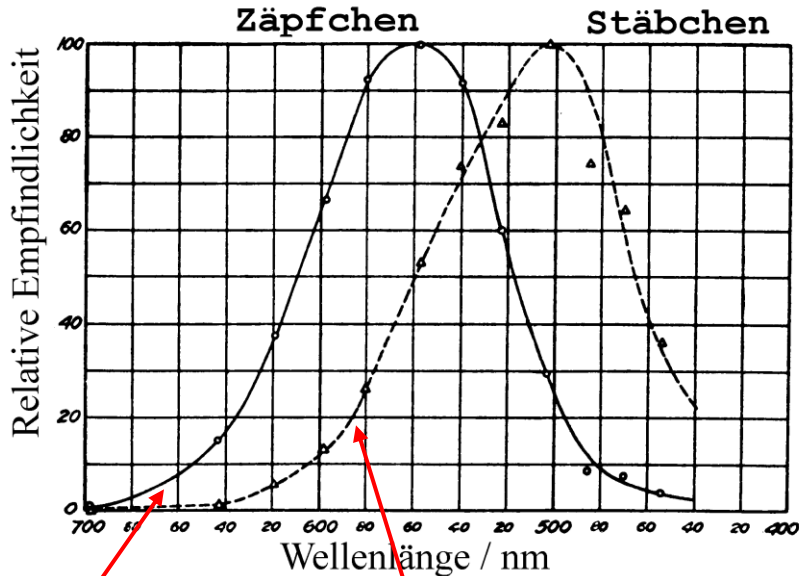
Strahlstärke $I = d\Phi/d\Omega$: Strahlungsfluß pro Raumwinkel (Watt/Steradian)

Bestrahlungsstärke $E = \Phi/A_b$:
Strahlungsfluß auf bestrahlte Fläche A_b
(Watt/m²)

Strahldichte $L=I/A_s$: Energiestrom aus strahlender Fläche A_s (Watt/ (m² Steradian))

Photometrische Größen 1

spektrale Empfindlichkeit
des Auges $V(\lambda)$ bzw. $V'(\lambda)$



Helladaption
(photopisch,
„Tagessehen“)
Maximum bei
555 nm (grün)

Dunkeladaption
(skotopisch,
„Nachtsehen“)
Maximum bei
507 nm
(türkis/blau)

$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda)$$

absolute Empfindlichkeit

$$K_m = 683 \text{ lm} / \text{W} \quad (\text{photopisch})$$

$$K'_m = 1699 \text{ lm} / \text{W} \quad (\text{skotopisch})$$

$$\text{Lichtstrom } \Phi_v = K(\lambda) \cdot \Phi \quad (\text{Lumen}) \text{ lm}$$

$$\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$$

$$\text{Lichtstärke } I_v = K(\lambda) \cdot I \quad (\text{Candela}) \text{ cd}$$

Basiseinheit

$$\text{Beleuchtungsstärke } E_v = K(\lambda) \cdot E$$

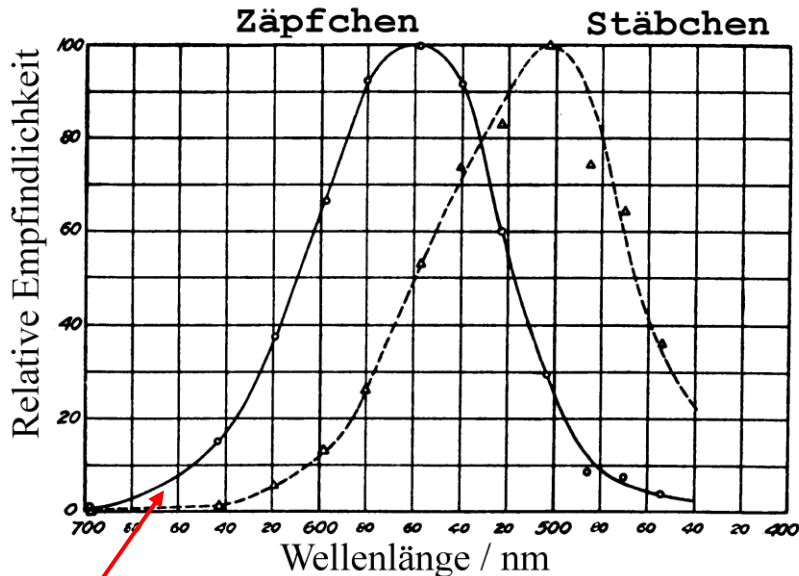
(Lux) lx = cd · sr/m²

$$\text{Leuchtdichte } L_v = K(\lambda) \cdot L \quad (\text{Stilb}) \text{ sb}$$

sb = cd/m²

Photometrische Größen 2

spektrale Empfindlichkeit
des Auges $V(\lambda)$ bzw. $V'(\lambda)$



Helladaption
Maximum bei
555 nm (grün)

$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda)$$

absolute Empfindlichkeit

$$K_m = 683 \text{ lm} / \text{W} \quad (\text{photopisch})$$

$$K'_m = 1699 \text{ lm} / \text{W} \quad (\text{skotopisch})$$

gesamte Lichtstärke:

$$I_{v,ges} = K_m \int I(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

gesamte Leuchtdichte:

$$L_{v,ges} = K_m \int L(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Eine **Candela** ist die Leuchtstärke, die von einer Strahlungsquelle erzeugt wird, die monochromatisches Licht der Frequenz $5,4 \cdot 10^{14}$ Hz (in Luft $\lambda=555$ nm) mit einer Leistung von $1/683$ Watt pro Raumwinkel-einheit emittiert wird

Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken

Leuchtdichten (cd/m ²)		Beleuchtungsstärken (Lux)	
Nachthimmel	$\sim 10^{-3}$	Sonnenschein	5000 - 70000
Mond	$\sim 10^3$	bedeckter Himmel	900 - 2000
Sonne	$\sim 10^9$	Straßenbeleuchtung	0.5 - 30
Glühlampenkolben	$\approx 3 \cdot 10^5$	Grobarbeitsplatz	50 - 100
Glühlampenwendel	$0.5 - 3.5 \cdot 10^7$	Feinarbeitsplatz	300 - 1000
Xe-Höchstdrucklampe	$\approx 10^{10}$	Feinstarbeitsplatz	1000 - 4000

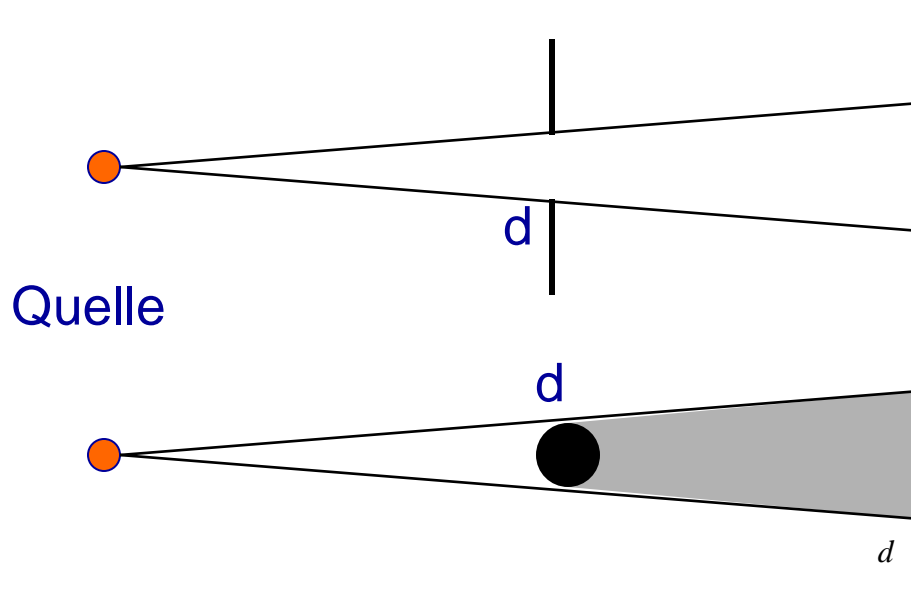
gesamte Leuchtdichte:

$$L_{v,ges} = K_m \int L(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

gesamte Beleuchtungsstärke:

$$E_{v,ges} = K_m \int E(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Lichtstrahlen und Fermatsches Prinzip



$d \gg \lambda$: geometrische Optik

$d \sim \lambda$: Wellenoptik

Licht breitet sich in homogenen Stoffen geradlinig aus. Die Ausbreitungsrichtung wird durch das Konzept des Lichtstrahls beschrieben, der die Richtung des Poynting-Vektors \vec{S} hat.

Fermatsches Prinzip: Licht nimmt denjenigen Weg, der die kürzeste Zeit benötigt.

Alternative Formulierung:

Licht durchläuft den Weg der kleinsten optischen Weglängen.

$$t = \sum_i \frac{s_i}{c_i} = \frac{1}{c_0} \sum_i n_i s_i$$

n : Brechungsindex
 $n \cdot s$: optische Weglänge

Merkhilfe:
Weg eines Rettungsschwimmers am Strand und im Wasser zum um Hilfe Rufenden im Wasser

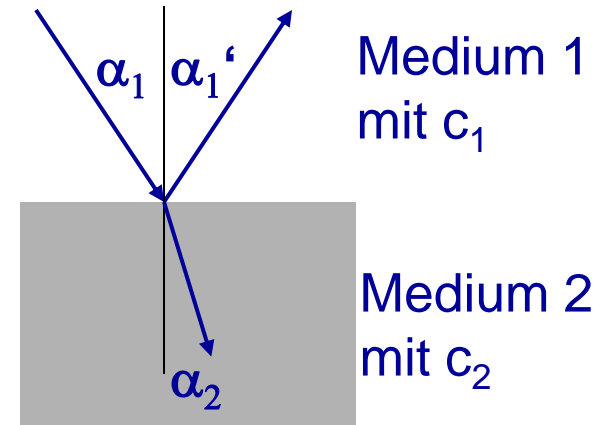
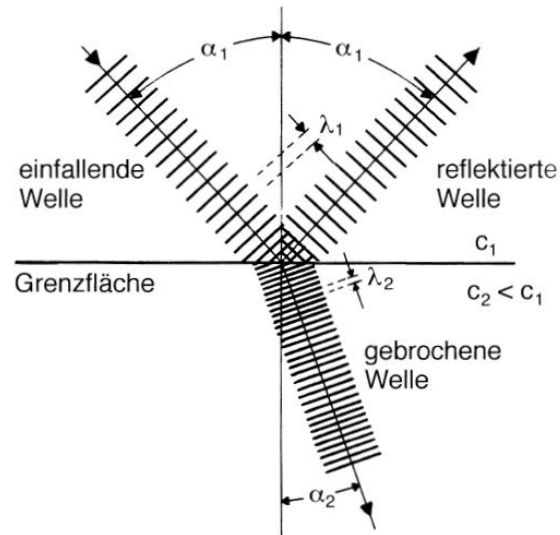
Brechung und Reflexion

Reflexion $\alpha_1 = \alpha_1'$

Lichtgeschwindigkeit in den Medien 1 und 2:

$$c_1 \neq c_2:$$

Frequenz bleibt gleich, aber Wellenlänge ändert sich



Snelliussches Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Außerdem:

Lichtstrahlen bleiben bei Reflexion und Brechung in einer Ebene.

$n_1 = \frac{c_0}{c_1}$ Brechungsindex =
Vakuumlichtgeschwindigkeit/
Lichtgeschwindigkeit im Medium

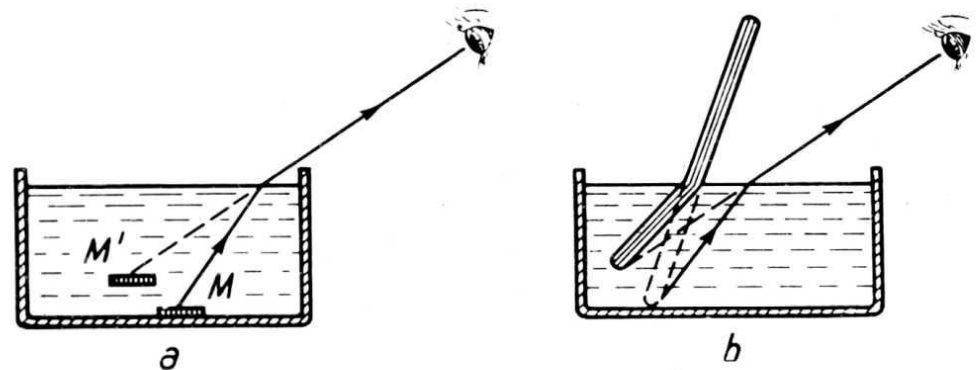


Abb. 36. Versuche zum Nachweis der Lichtbrechung

- a) scheinbare Hebung einer im Wasser liegenden Münze
- b) scheinbare Knickung eines schräg ins Wasser getauchten Stabes

Totalreflexion

Totalreflexion

vom optisch dichteren zum optisch dünneren: $n_1 > n_2$

$$\sin \alpha_1 = \frac{n_2}{n_1} \sin \alpha_2$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{< 1}$

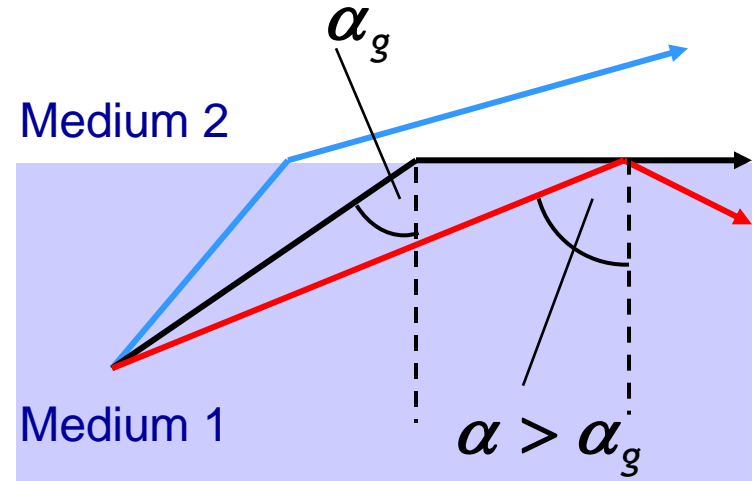
Für $\alpha_2 = 90^\circ$

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

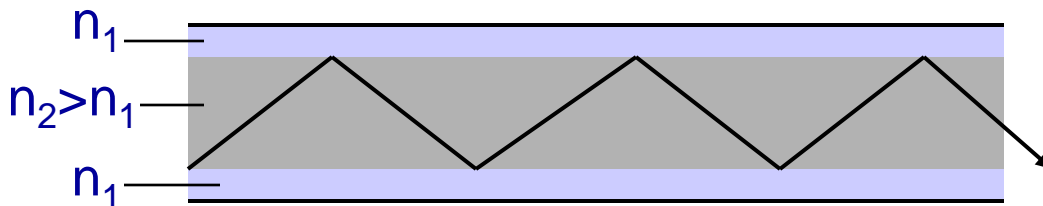
Grenzwinkel der Totalreflektion

Für flachere Winkel $\alpha > \alpha_g$: vollständige Reflexion

Für steilere Winkel $\alpha < \alpha_g$: teilweise Reflexion, teilweise Brechung



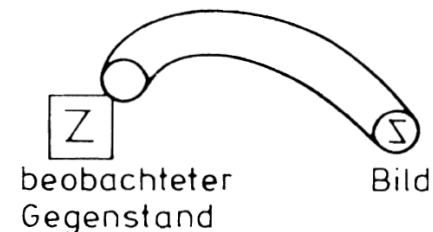
Lichtleiter



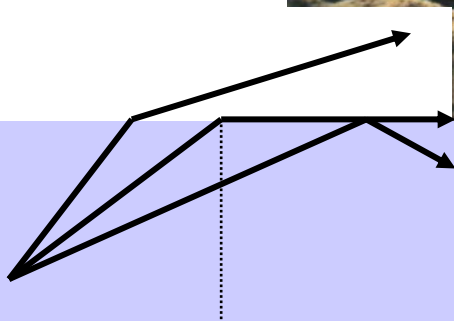
Datenübertragung:



Faserbündel
=> Endoskopie:



Totalreflexion

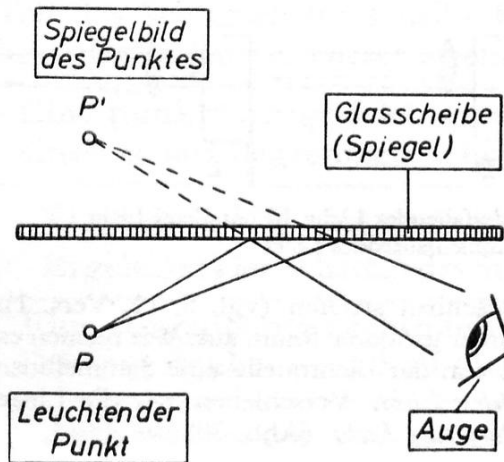


Experimente zur Geometrischen Optik

Experimente (Geometrische Optik):

- Reflexion
- virtuelles Bild einer Kerze bei Reflexion an einer Glasscheibe
- Lichtbrechung, Snellius
- Totalreflexion
- Dispersion des Lichtes (Aufspaltung von weißem Licht in Spektralfarben, Vereinigung zu weiß mit Sammellinse, Hohlprismen mit Wasser bzw. Schwefelkohlenstoff, Geradsichtprisma, achromatisches Prisma)
- Strahlengang an einer Sammellinse bzw. Zerstreuungslinse
- Bildentstehung an einer Sammellinse
- Bessel-Methode zur Brennweitenbestimmung
- Optische Instrumente
 - Lupe
 - evtl. Fernrohr
 - Mikroskop (evtl. erst nach Wellenoptik)

Planspiegel



Planspiegel

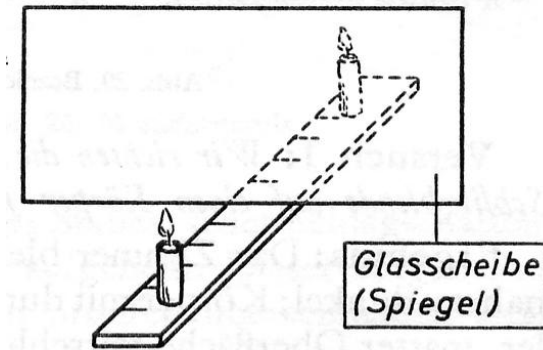


Abb. 32.

Reelles Bild kann auf Schirm abgebildet werden

Virtuelles Bild benötigt noch eine weitere Abbildung (z.B. durch Auge)



Spiegelung in
einer Pfütze

Hohlspiegel

Brennpunkt F (Fokus) Mittelpunkt M

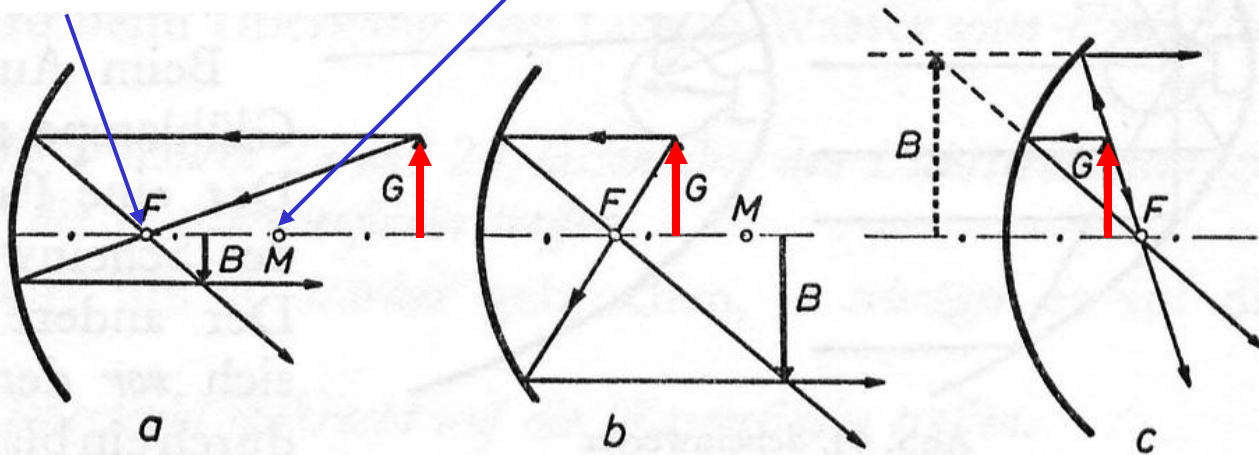
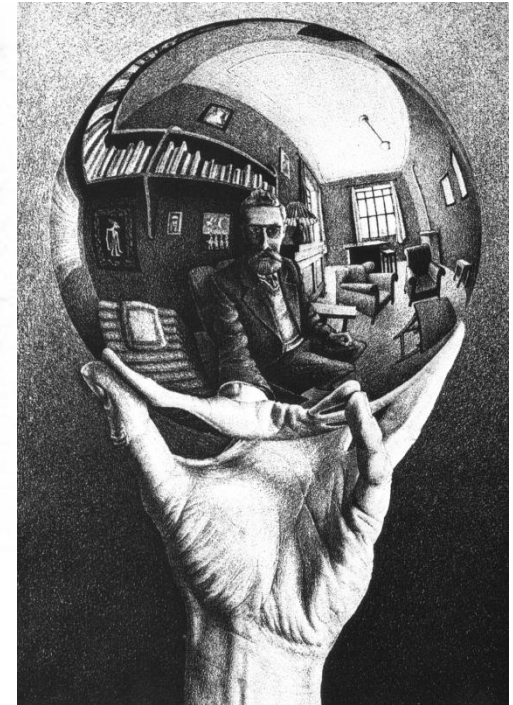


Abb. 42. a—c Bilder am Hohlspiegel



Gegenstand G
(Gegenstandsweite g)
Bild B (Bildweite b)

Krümmungsradius r : Abstand zum Mittelpunkt M
Brennweite f : Abstand zum Brennpunkt F
Für achsennahe Strahlen: $f = r/2$

(Spiegelung jeweils an Tangente an Kreis)

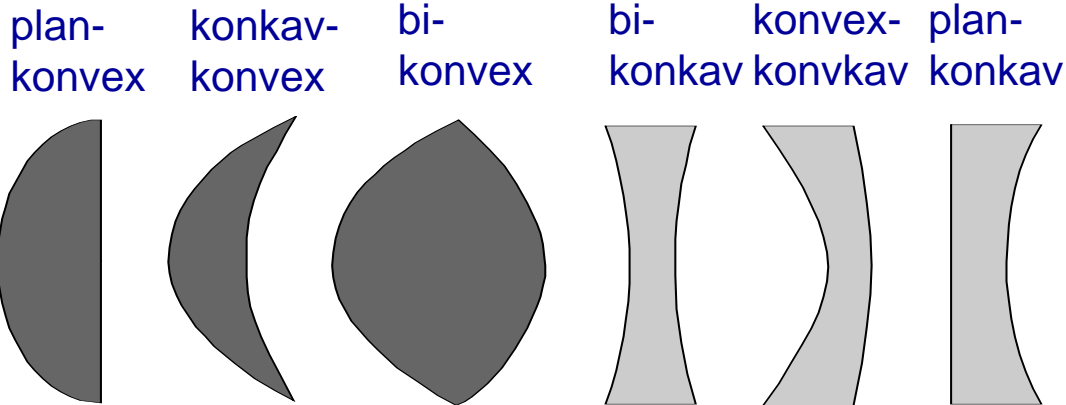
Abb. a und b: reelle Bilder (mit $B < G$ bzw. $B > G$)

Abb. c: virtuelles Bild ($b < f$; immer $B > G$)



Zahnarzt-Hohlspiegel

Übersicht Linsen



Abbildungsmaßstab:

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

Linsengleichung:

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

g : Gegenstandsweite
 b : Bildweite
 f : Brennweite

Die Vereinfachung kann nicht immer so angewendet werden, vgl. Auge, dort:

$$\frac{n_1}{g} + \frac{n_2}{b} = \frac{n_L - n_1}{r_1} + \frac{n_L - n_2}{r_2}$$

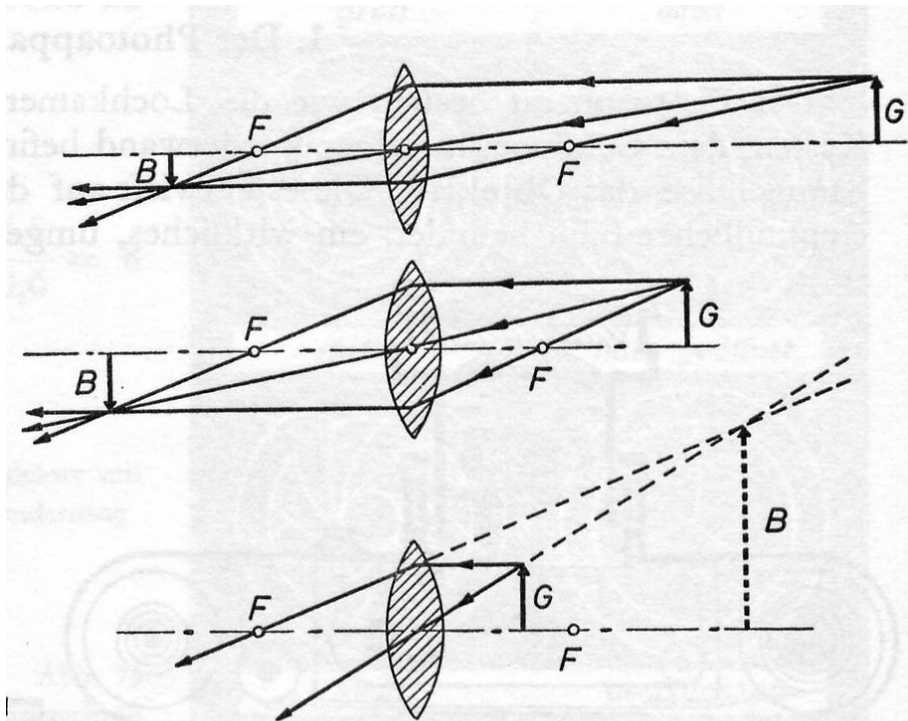
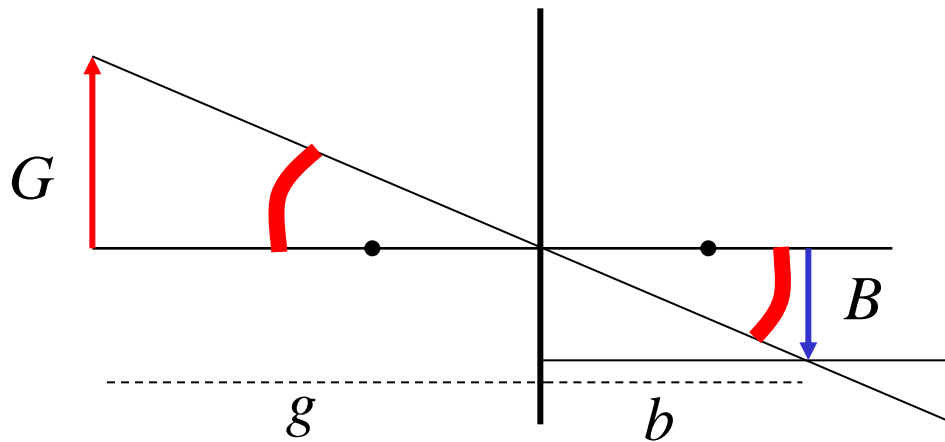
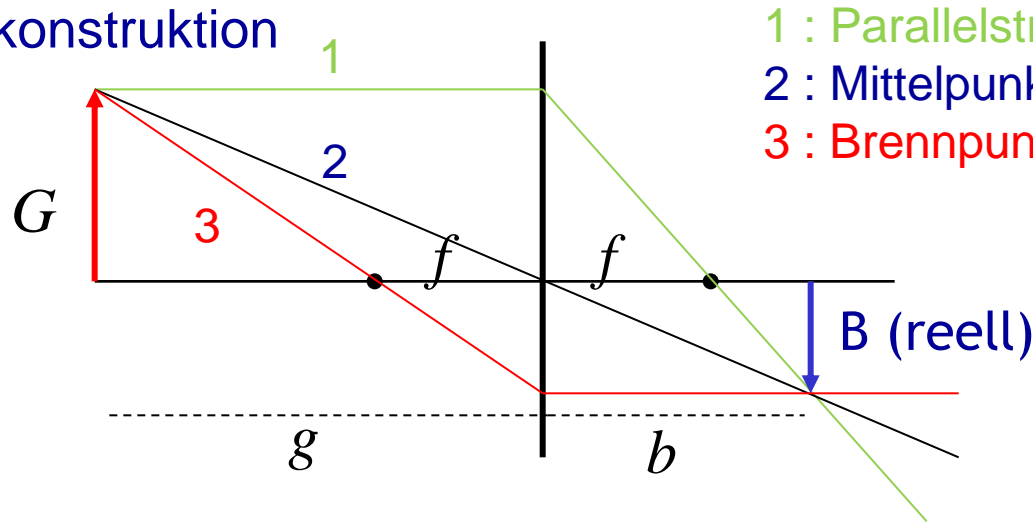


Abb. 65 a - c. Bilder bei Sammellinsen

Sammellinse 1

Bildkonstruktion



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

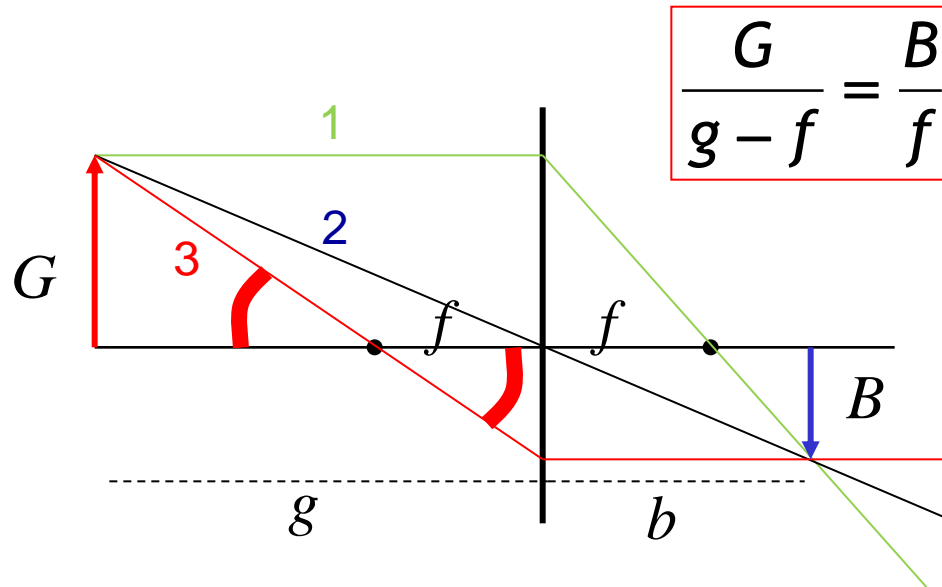
$$\frac{B}{b} = \frac{G}{g} \quad \text{bzw.} \quad \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

Also Abbildungsmaßstab

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

Sammellinse 2

Bildkonstruktion



- 1 : Parallelstrahl
- 2 : Mittelpunktstrahl
- 3 : Brennpunktstrahl

setze Abbildungsmaßstab

$$B = \frac{b}{g} G \quad \text{ein.}$$

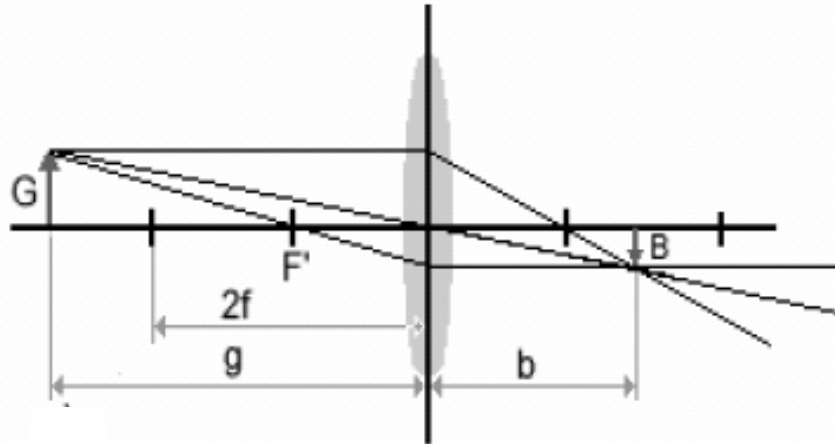
$$\Rightarrow \frac{1}{g-f} = \frac{b}{g} \frac{1}{f}$$

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

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

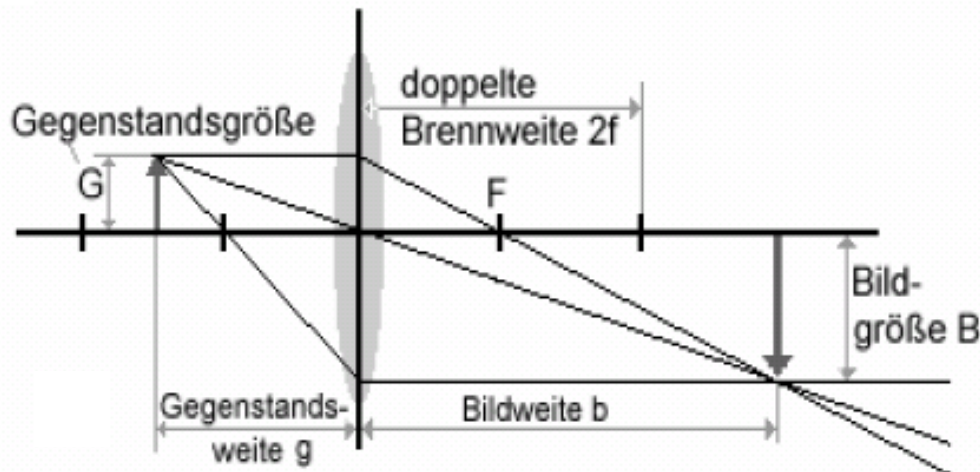
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

Sammellinse 3



$$g > 2f \Rightarrow B < G$$

$$g = 2f \Rightarrow B = G$$



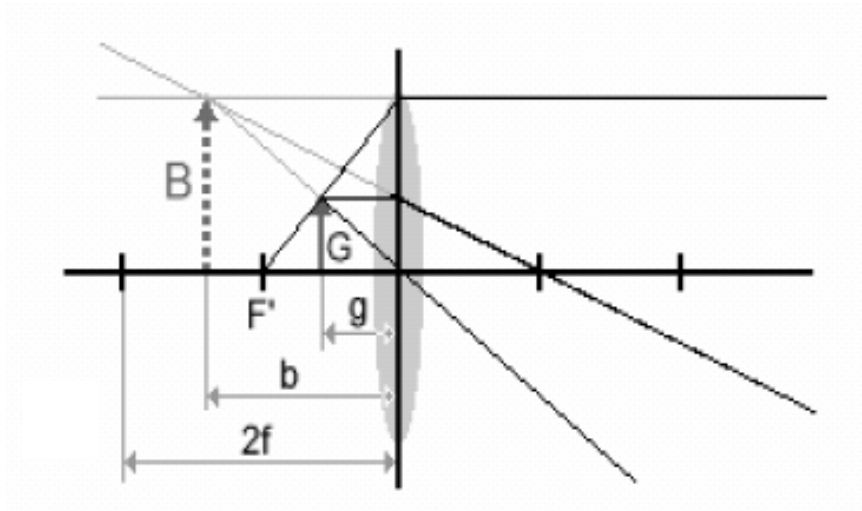
$$2f > g > f \Rightarrow B > G$$

$$g \rightarrow f \Rightarrow B \rightarrow \infty$$

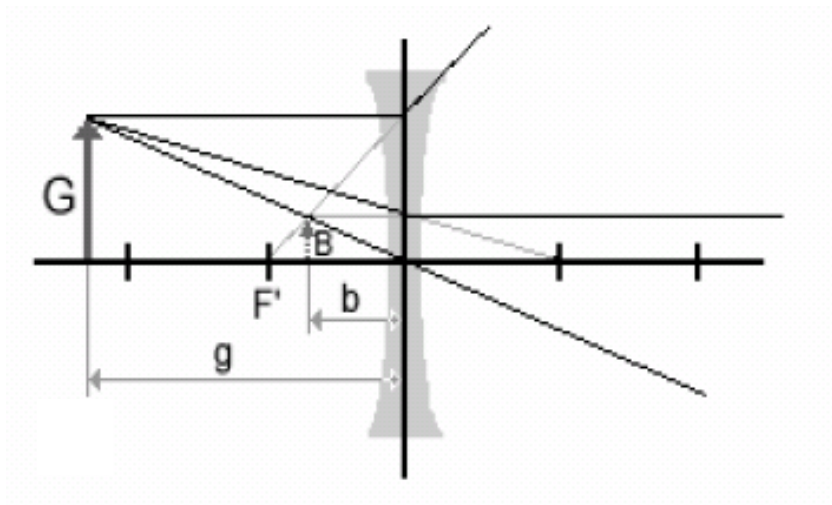
Virtuelle Abbildungen

bei Sammellinsen:

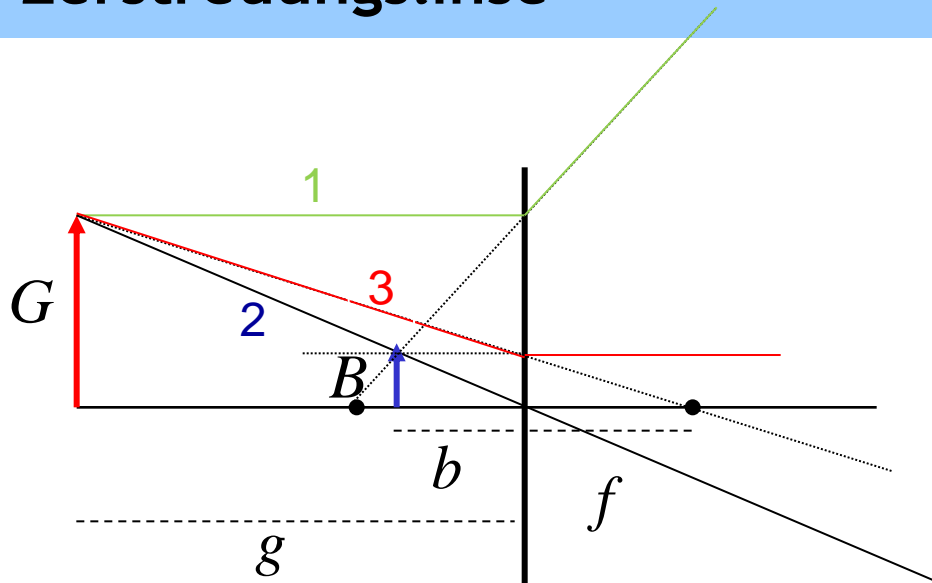
$$g \leq f$$



bei Zerstreuungslinsen:
(negative Brennweiten !)



Zerstreuungslinse



negative Brennweite!

1 : Parallelstrahl

2 : Mittelpunktstrahl

3 : Brennpunktstrahl

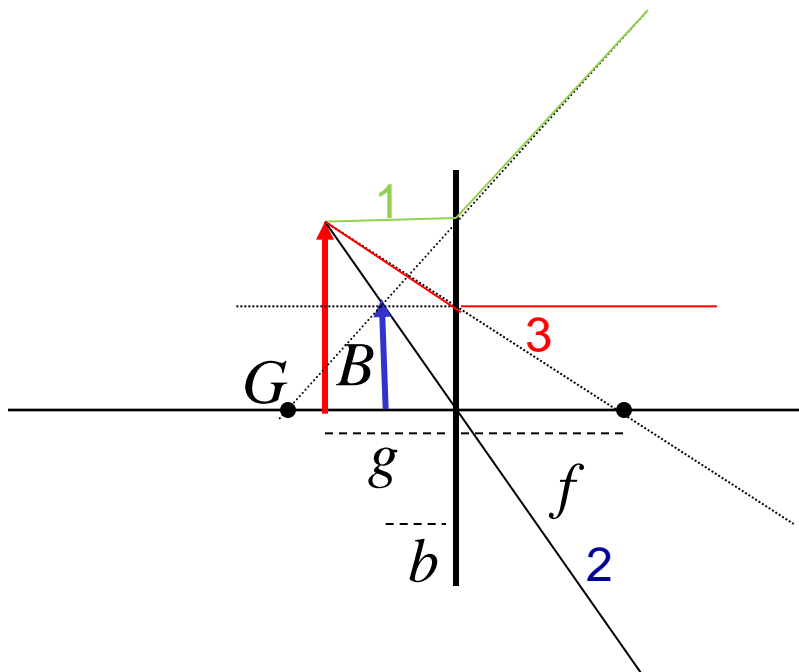
**Rückwärtige Verlängerung
der Lichtstrahlen!**

Abbildungsmaßstab
wie gehabt:

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

$B < G$ unabhängig
vom b/f -Verhältnis

Bei neg. Brennweite
Bilder immer virtuell.



Brechkraft und Linsenkombinationen

Die Brechkraft D in Dioptrien (dpt = 1/m) ist Kehrwert der Brennweite in Metern.

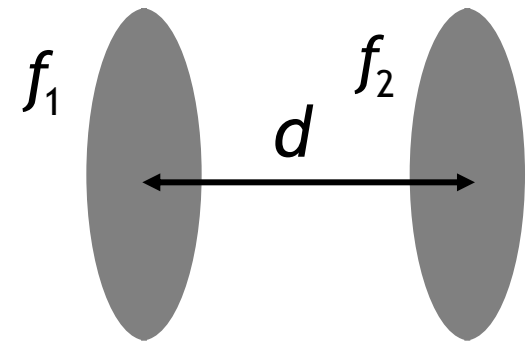
Dünne Linsen in kleinem Abstand voneinander

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad \text{bzw.} \quad D = D_1 + D_2$$

$$D = \frac{1}{f}$$

Allgemeiner für endlichen Abstand d :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad \text{bzw.} \quad D = D_1 + D_2 - d D_1 D_2$$



Speziell für $f_2 = -f_1$ d.h. $D_2 = -D_1$

$$f = f_1^2 / d \quad \text{bzw.} \quad D = d D_1^2$$

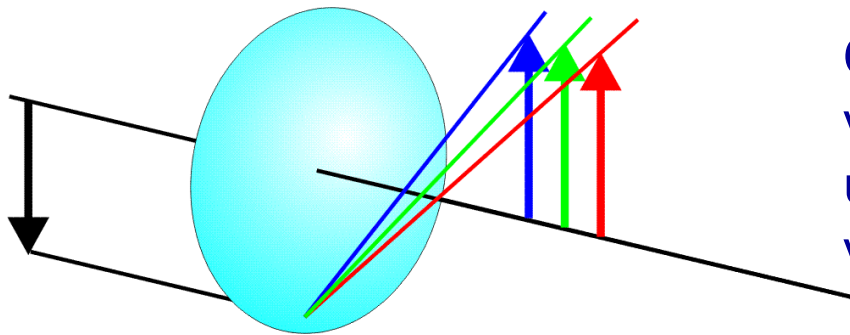
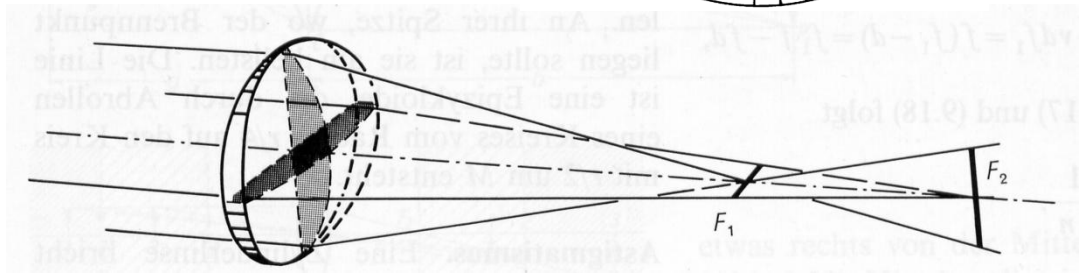
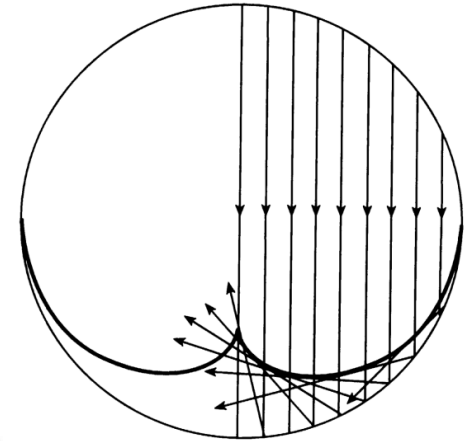
Immer positiv!
(Wird auch in der
„Ionenoptik“ verwendet)

Weitere Linsenkombinationen bei
optischen Instrumenten (Mikroskop, Fernrohr)

Abbildungsfehler

Sphärische Aberation: Achsenferne Strahlen haben kleinere Brennweite als achснаhe Strahlen (Kauistik)

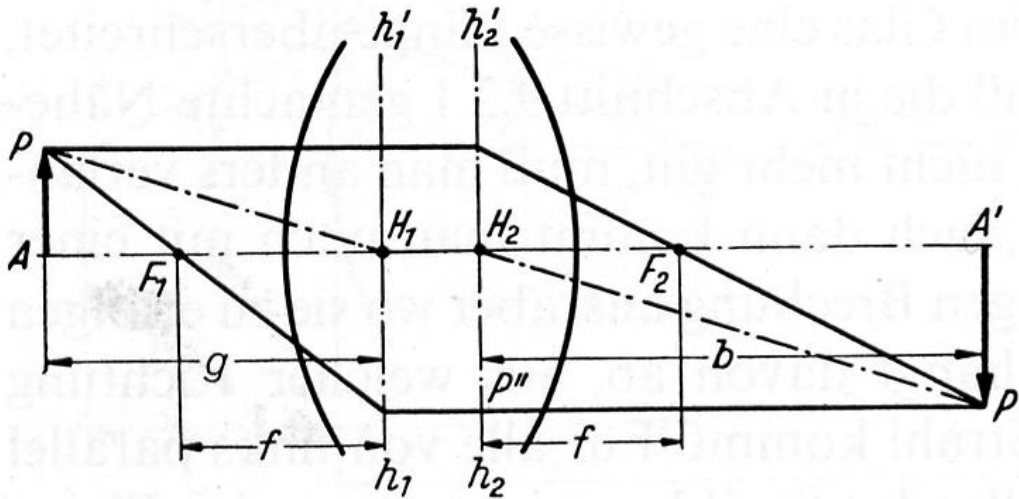
Astigmatismus: In zwei senkrechten Ebenen verschiedene Krümmungsradien und damit verschiedene Brennweiten (Extremfall: Zylinderlinse). Astigmatismus auch bei schrägem Einfall auf sphärische Linse.



Chromatische Aberation: Dispersion verursacht verschieden starke Brechung und damit verschiedene Brennweiten für verschiedene Wellenlängen des Lichtes
→ mehrere farbige Bilder

Wird korrigiert bei „Achromaten“ durch Kombination von Linsen aus Verschiedenen Glassorten, d.h. mit verschiedenen Brechungsindizes.

Dicke Linse



Statt Mittelebene der dünnen Linse: **2 Hauptebenen**

Wenn Gegenstand und Bild noch in optisch verschiedenen Medien:
2 Knotenebenen

Auge: 6 Kardinalelemente

- 2 Hauptebenen
- 2 Knotenebenen
- 2 Brennebenen

Brennweitenbestimmung mittels Besselmethode

Linsengleichung war $f = \frac{g \cdot b}{g + b}$

Dazu müssen g und b gut bestimmbar sein.

Es geht aber auch ohne g und b :
Bei festem Abstand e zwischen
Gegenstand und Bildebene (Schirm)
mit $e = g + b > 4f$ [wieso?]
gibt es zwei Linsenstellungen mit
Abstand d , bei denen ein scharfes
Bild eingestellt werden kann.

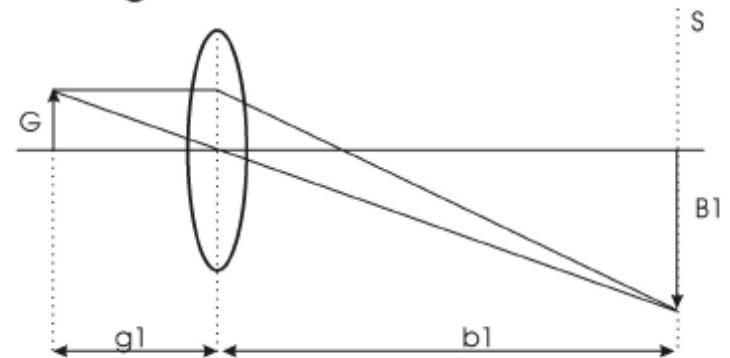
$$e = b + g \quad b = (e + d) / 2$$

$$d = b - g \quad \text{also} \quad g = (e - d) / 2$$

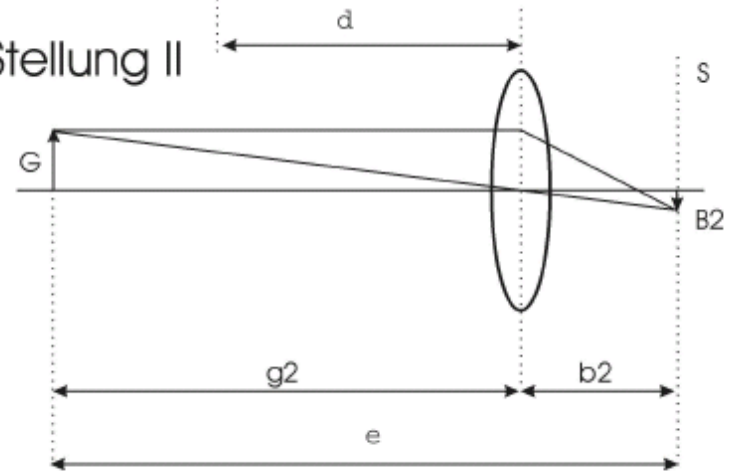
damit $f = \frac{(e + d) \cdot (e - d)}{4e} = \frac{e^2 - d^2}{4e}$

$$f = \frac{1}{4} \left(e - \frac{d^2}{e} \right)$$

Stellung I



Stellung II



Das Auge

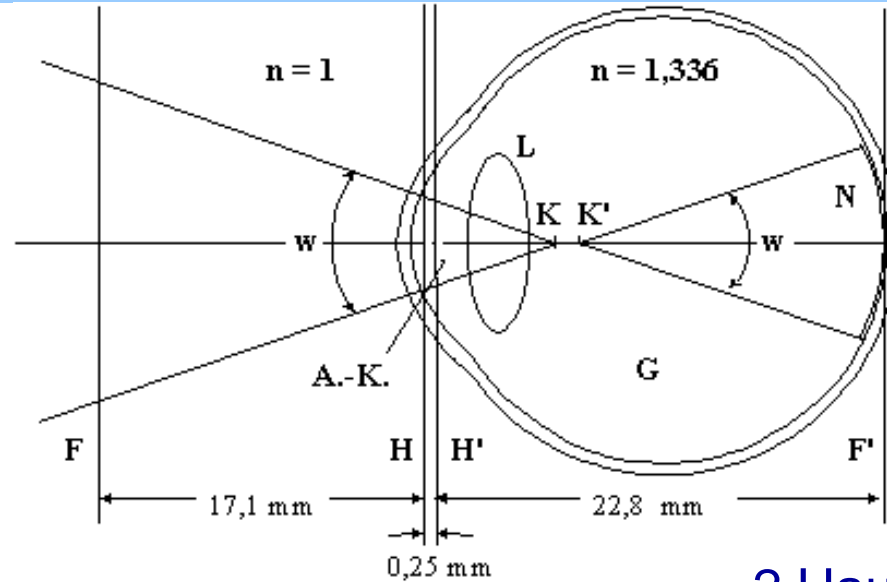
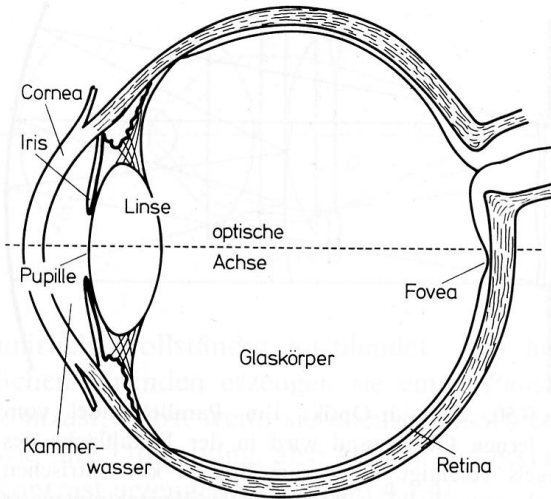
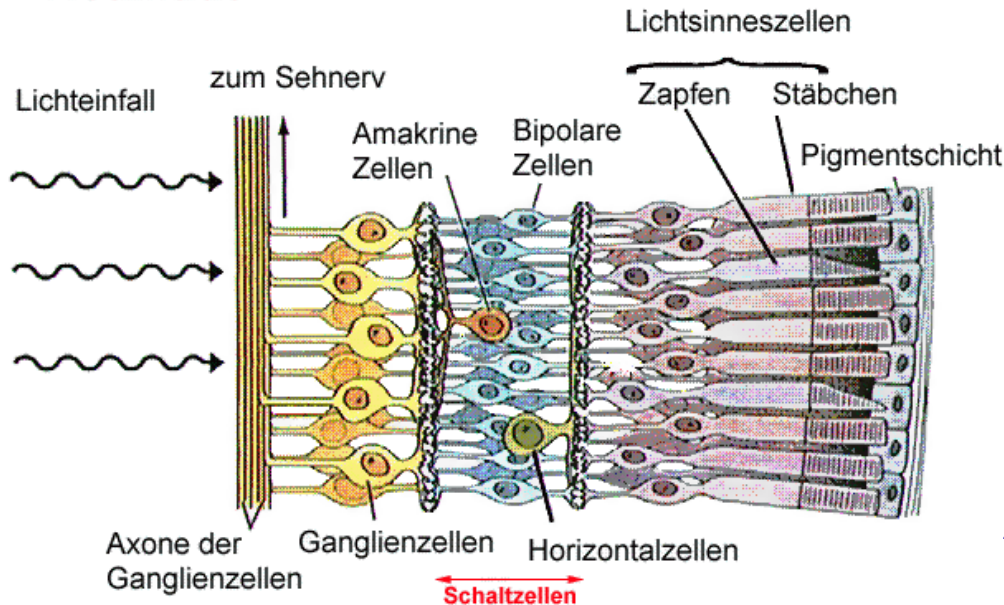


Abb. 9.51. Schnitt durch das menschliche Auge. (Nach H.-U. Harten)

2 Hauptebenen
2 Knotenebenen
2 Brennebenen

Netzhaut

Richtung der Informationsübertragung

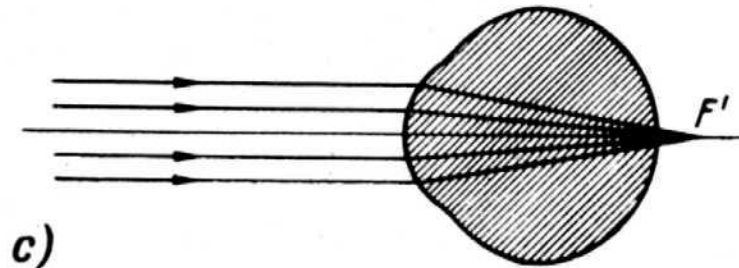
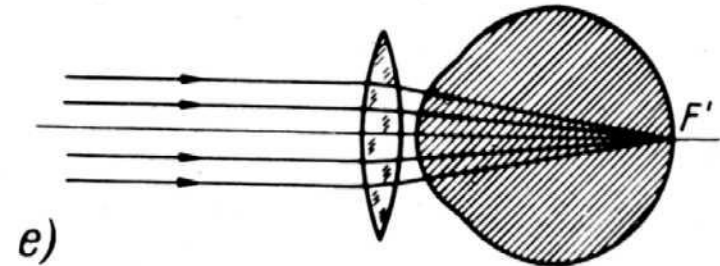
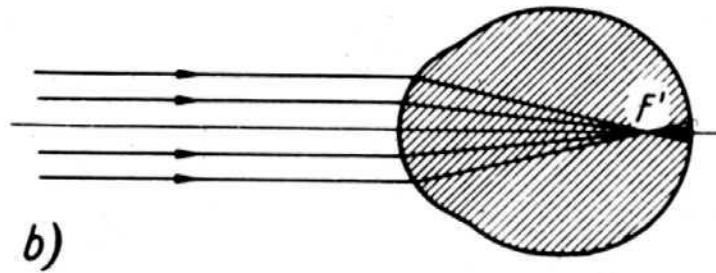
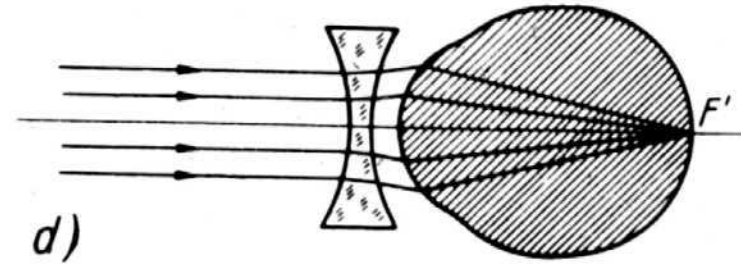
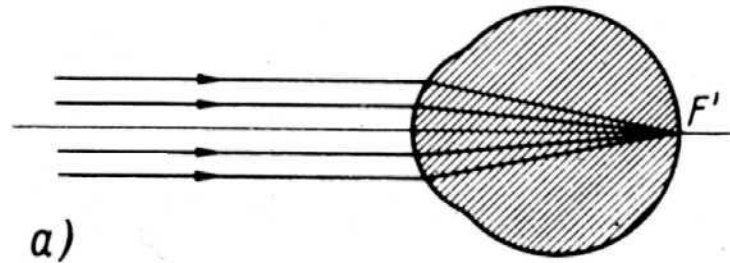


Zäpfchen: Farbsehen
(größere Schwellenenergie)

Stäbchen: Dunkelsehen
(geringere Schwellenenergie)

Auflösungsvermögen des Auges:
1 Bogenminute

Fehlsichtigkeiten



- a) Normalsichtigkeit
- b) Kurzsichtigkeit
- c) Fern-/Übersichtigkeit
- d) Korrektur der Kurzsichtigkeit
- e) Korrektur der Übersichtigkeit

Lupe

Die Lupevergrößerung ist willkürlich definiert durch Vergleich von Sehwinkel mit und ohne Lupe, wobei

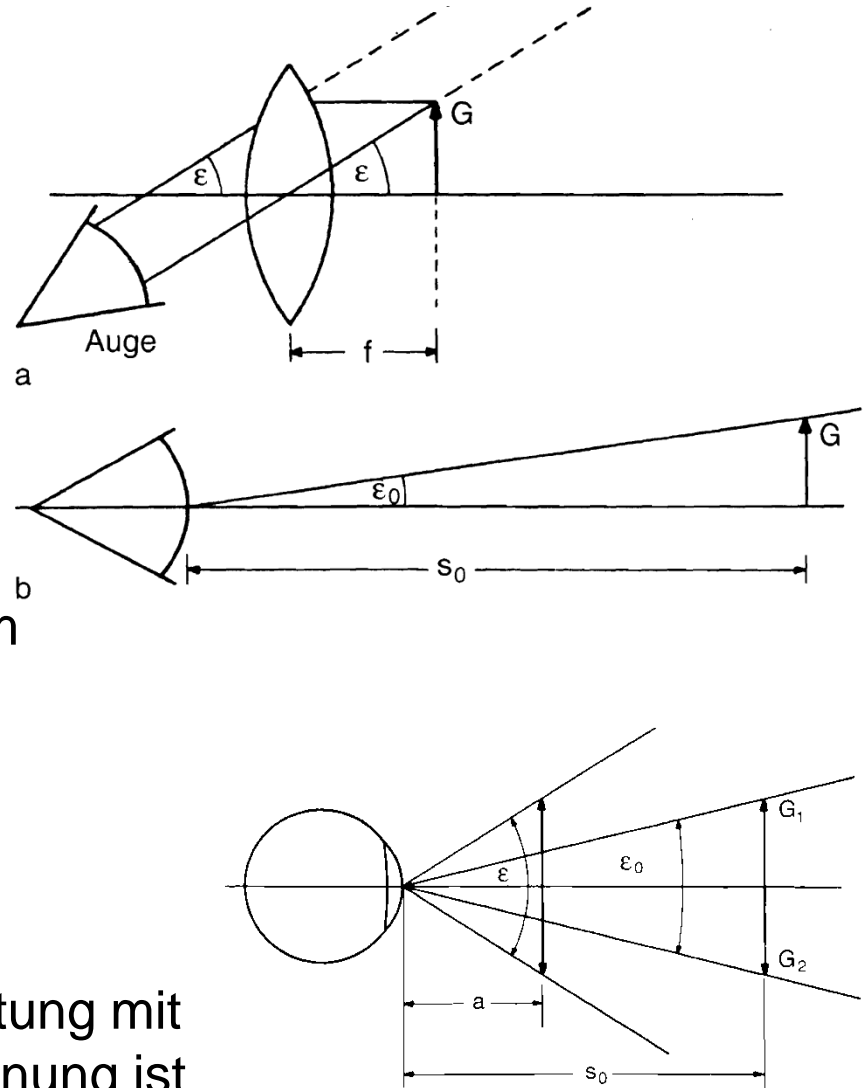
Gegenstandsweite = Brennweite (d.h. Bild im Unendlichen)

und Sehwinkel ohne Lupe in „deutlicher Sehweite“ $s_0 = 25 \text{ cm}$ (per Definition)

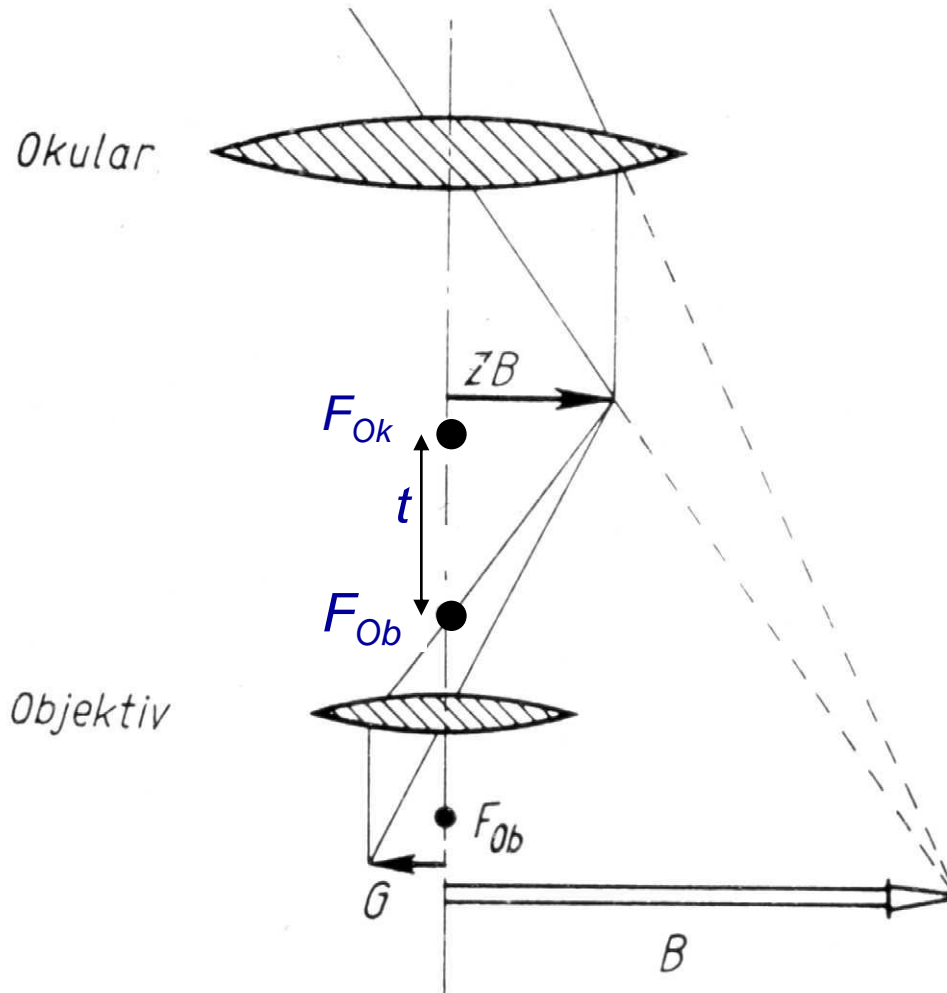
Damit gilt für die Lupevergrößerung

$$V = \frac{s_0}{f}$$

Bemerkung: Bei direkter Beobachtung mit bloßem Auge in 10 cm Entfernung ist die „subjektive Vergrößerung“ also auch $V = 2,5$!)



Mikroskop Strahlengang



2 Sammellinsen:
Kurzbreitweitiges Objektiv erzeugt reales Zwischenbild (ZB), das durch Okular wie durch eine Lupe betrachtet wird (virtuelles Bild B).

Vergrößerung:

$$V_{ges} = V_{Ob} \cdot V_{Ok} \approx \frac{t}{f_1} \frac{s_0}{f_2}$$

Wobei die optische Tubuslänge t , die Entfernung der beiden Brennpunkte zwischen den Linsen bezeichnet.

Maximale Vergrößerung beim Lichtmikroskop etwa 1000.
Höhere sind „leere“ Vergrößerungen!

Bemerkung: Fiktive Strahlen zur Bildkonstruktion verwendet
Tatsächliche Lichtstrahlen im Bündelstrahlengang
(nächste Folie, berücksichtigt Aperturen und Blenden)

Mikroskop-Auflösungsvermögen

2 Punkte im Objekt

=> 2 getrennte Punkte im Bild

Begrenzung durch Beugungseffekte

trennbarer Minimalabstand Δs für selbstleuchtende Objekte (Helmholtz)

$$\Delta s = \frac{0.61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin \alpha}$$

bzw. nicht-selbstleuchtende Objekte (Abbé)

$$\Delta s = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha}$$

λ : Wellenlänge des Lichtes

n : Brechungsindex des Mediums zw.

Objekt (Deckgläschen) und Objektiv

(Luft oder Immersionsöl)

α : halber Öffnungswinkel des Strahlenbündels

$n \cdot \sin \alpha$: numerische Apertur des Objektivs

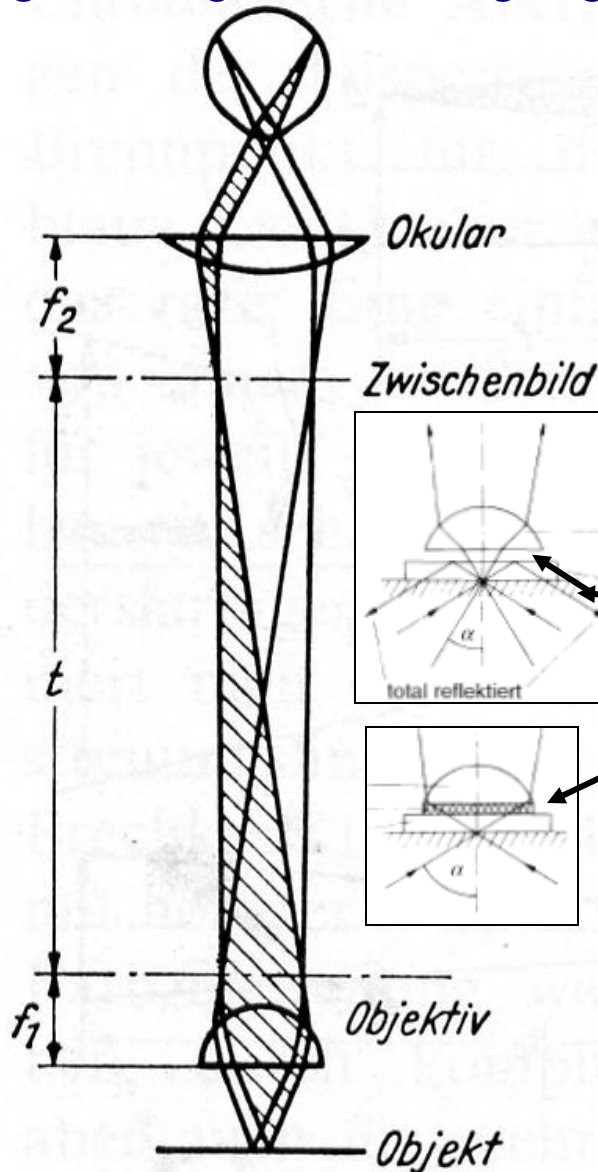
Für hohe Auflösungen verwende kleinere Wellenlängen, d.h. blaues Licht

(auch bei Auflösung von DVDs: „blue ray disks“)

Noch höher mit Elektronenstrahlen mit

de Broglie-Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m v}$$



Okular

f_2

Zwischenbild

t

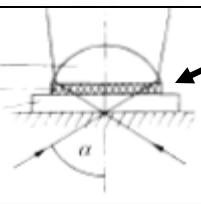
f_1

Objektiv

Objekt

Frontlinse
Immersion
Deckglas

total reflektiert



Fernrohre

Gegenstand weit weg (Idealisierung: im „Unendlichen“)

Objektiv führt zu reellem Bild (bei $b = f_1$), das durch Okular

wie mit Lupe betrachtet wird (Projektion wieder ins Unendliche)

Betrachte die Öffnungswinkel α des Strahlenbündels

$$V = \frac{\alpha_{\text{Okular}}}{\alpha_{\text{Objektiv}}} \approx \frac{\tan \alpha_{\text{Okular}}}{\tan \alpha_{\text{Objektiv}}}$$
$$= \frac{B / f_{\text{Okular}}}{B / f_{\text{Objektiv}}} = \frac{f_{\text{Objektiv}}}{f_{\text{Okular}}}$$

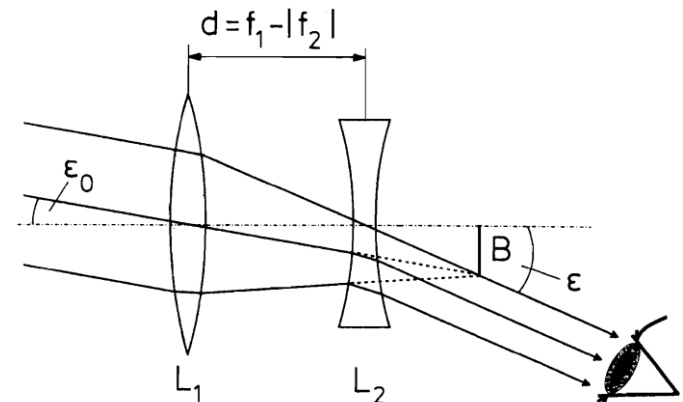
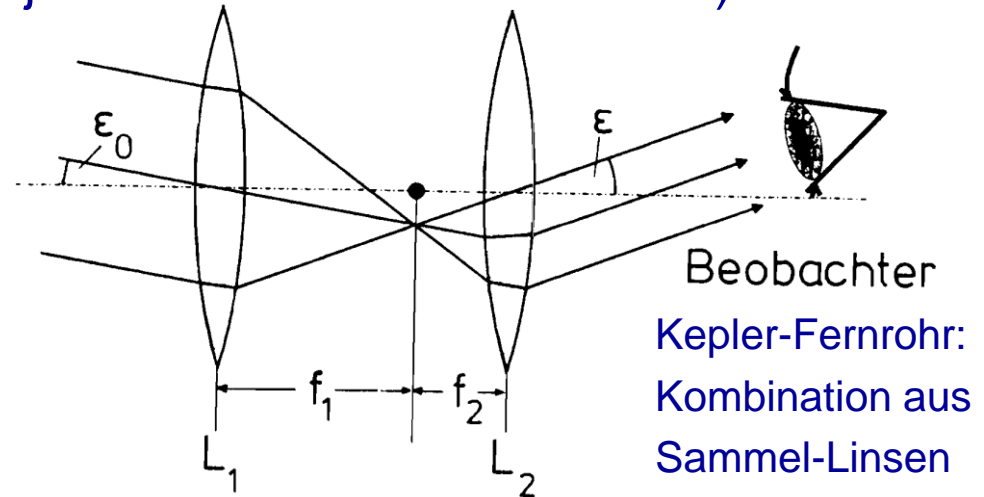
Wichtig (oft wichtiger als Vergrößerung):

„Lichtstärke“ entsprechend der Fläche des Objektivs (Durchmesser D)

⇒ Definiere Blende = f/D

(kleine Blende entspr. großer Lichtstärke

vgl. Kleinbild-Fotokameras: 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6)



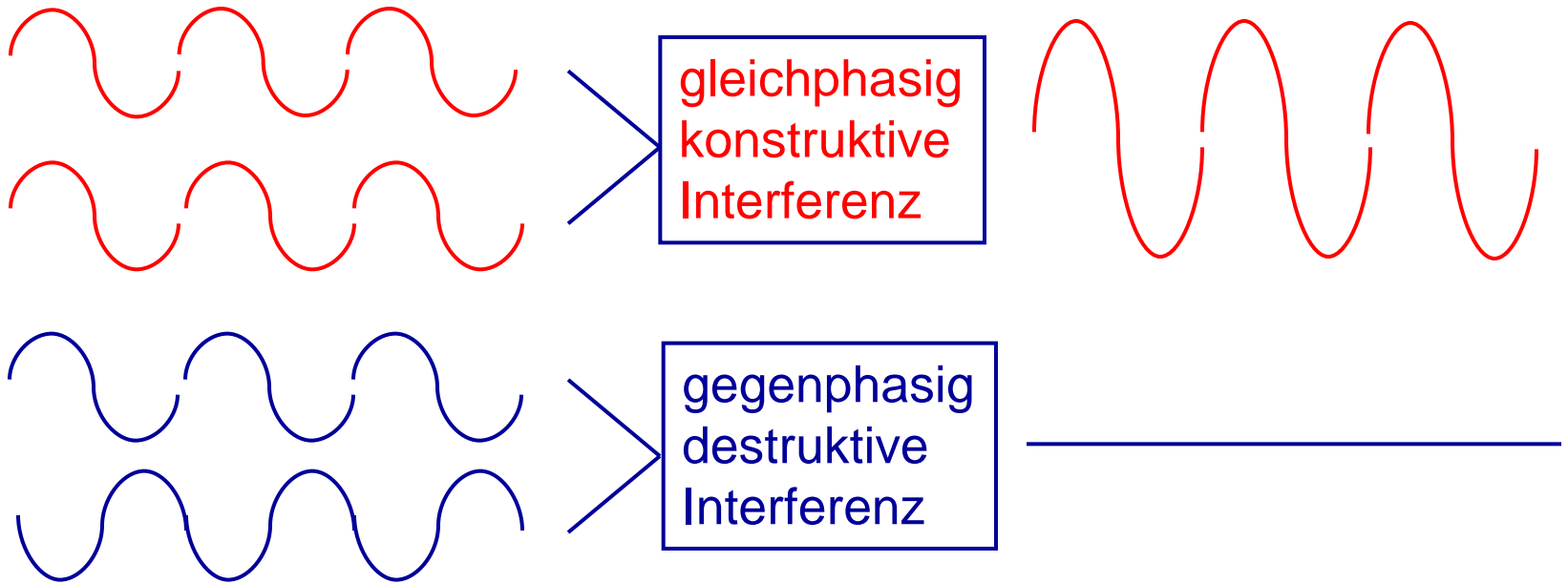
Galilei-Fernrohr: Kombination aus Sammel- und Zerstreuungslinse. Formeln analog.

Experimente zur Wellenoptik

- Beugungsphänomene
 - Doppelspalt
 - Gitter (verschiedene, mit Laser und mit weißem Licht)
 - Einzelspalt
 - farbige Interferenzringe bei Reflexion an Glimmerplatte
- Polarisation
 - Polarisationsfolien (Polarisator / Analysator)
 - Erzeugung mit
 - Laser
 - Brewsterwinkel
 - Doppelbrechung (Kalkspat-Kristall)
 - Drehung durch
 - Zuckerlösung
 - Faraday-Effekt

Wellenoptik

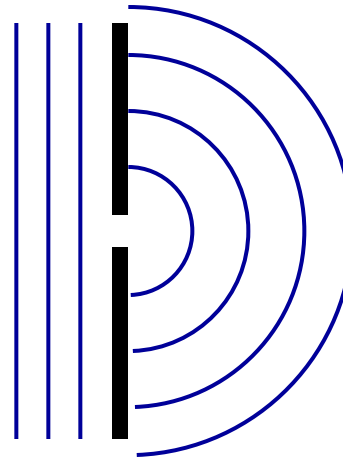
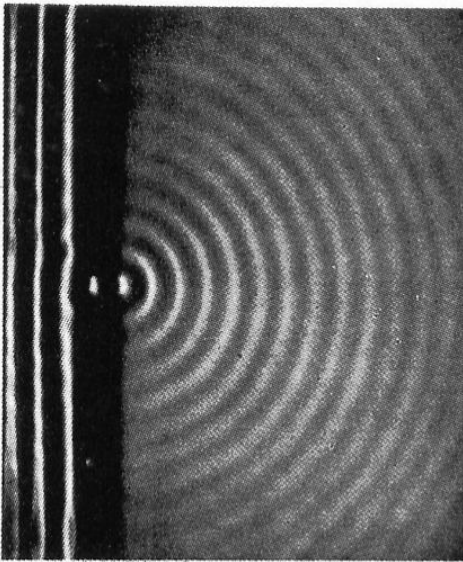
kohärente (phasenstarre) Überlagerung



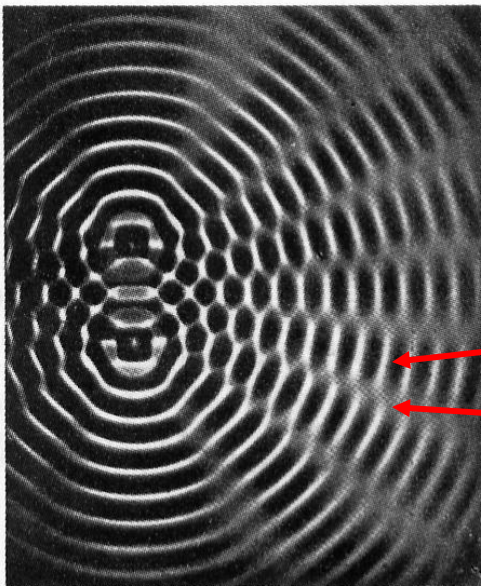
Huygenssches Prinzip:

Jede Welle kann als Überlagerung von Kugelwellen (Elementarwellen) angesehen werden. Jeder Punkt einer Welle sendet neue Elementarwellen aus. Die Einhüllende der Elementarwelle ist die neue Wellenfront.

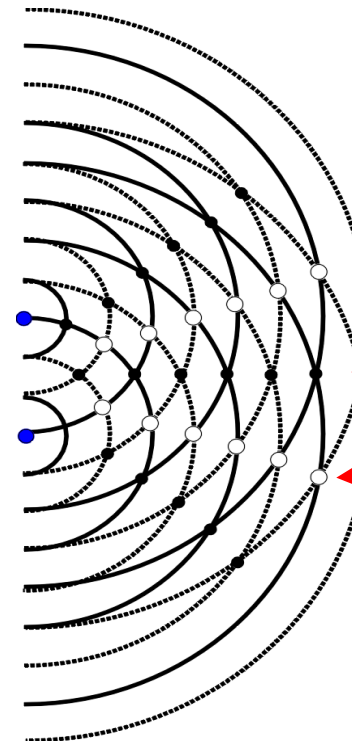
Beugung



Entstehung von Kugelwellen hinter einem „punktförmigen“ Spalt



konstruktiv
destruktiv



Interferenz und am Doppelspalt

- konstruktiv
- destruktiv

Interferenz am Doppelspalt

Beugungsmaxima:

$$D \sin \alpha = n \lambda$$

Beugungsminima:

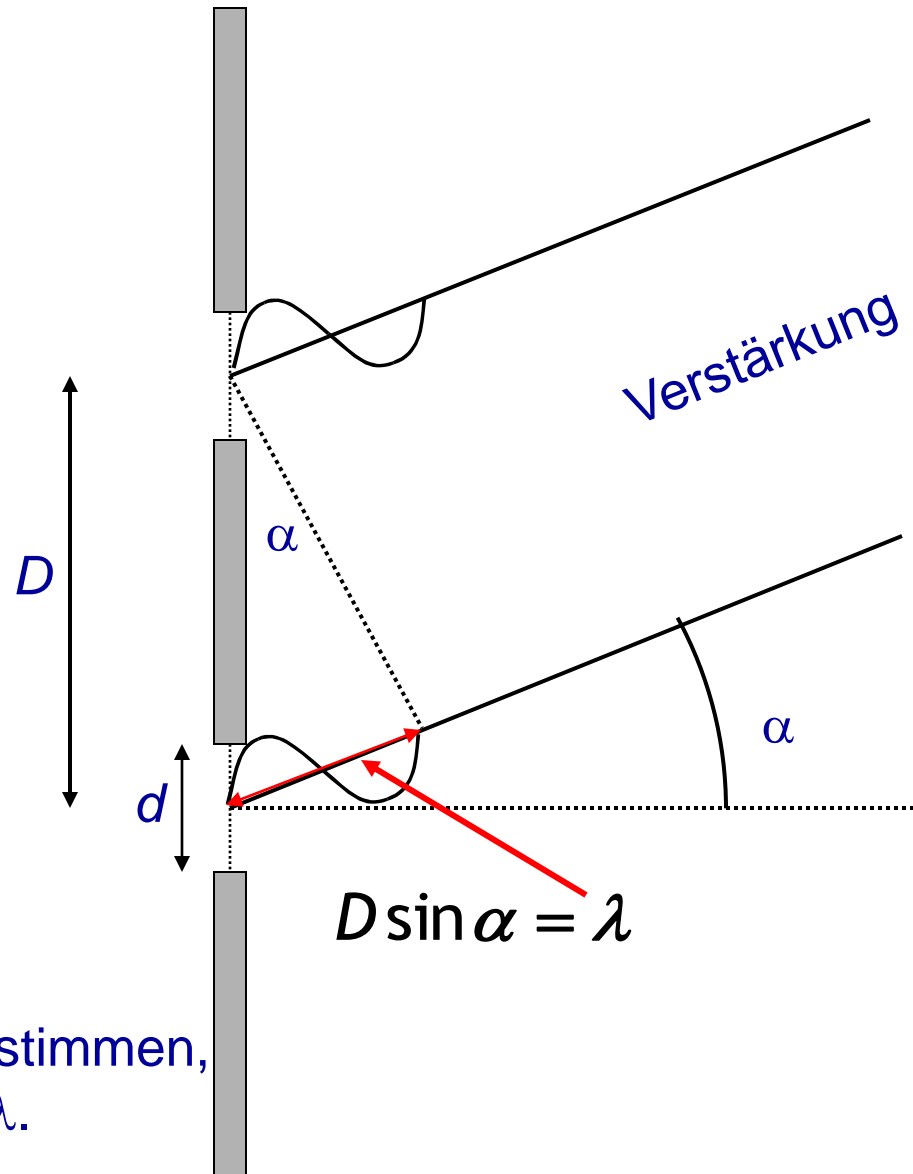
$$D \sin \alpha = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

d : Spaltbreite
(hier d vernachlässigt,
d.h. $d \ll D$)

D : Spaltabstand

$$n = (0,) 1, 2, 3, \dots$$

Bei bekanntem λ lässt sich D bestimmen,
bei bekanntem D entsprechend λ .



Beugung am Gitter

Wie beim Doppelspalt
Beugungsmaxima:

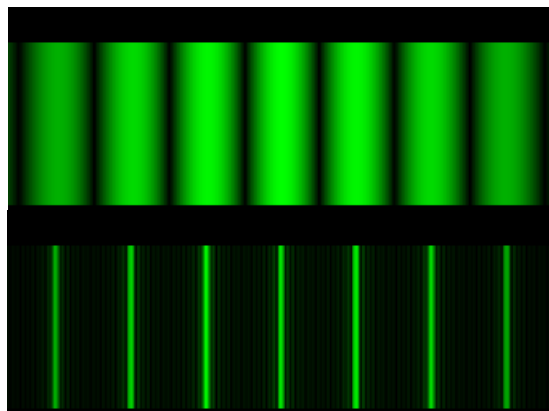
$$D \sin \alpha = n \lambda$$

Beugungsminima:

$$D \sin \alpha = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

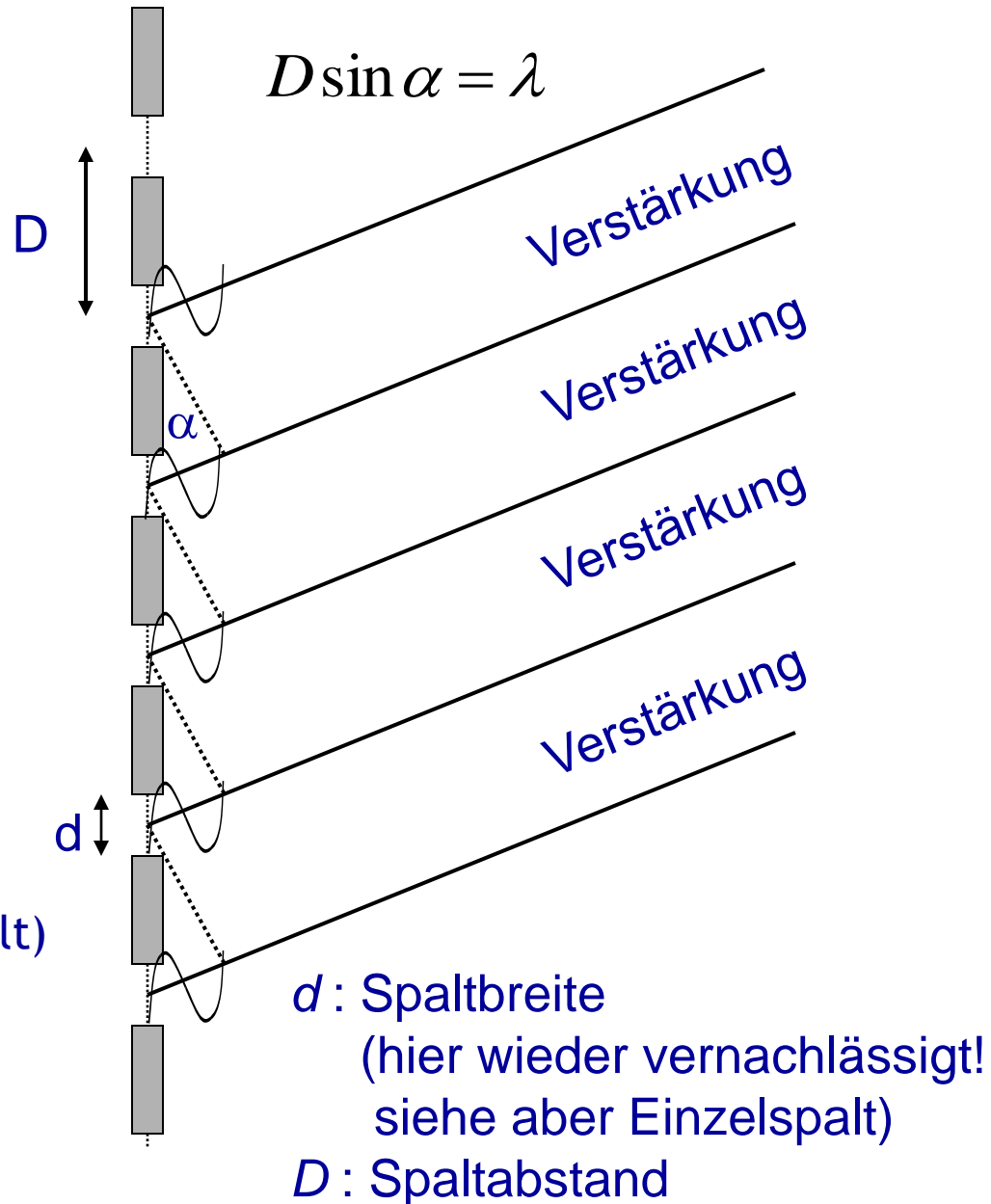
$$n = (0,) 1, 2, 3, \dots$$

Die „Schärfe“ der Maxima wächst mit der Zahl der ausgeleuchteten Spalte



2 Spalte
(Doppelspalt)

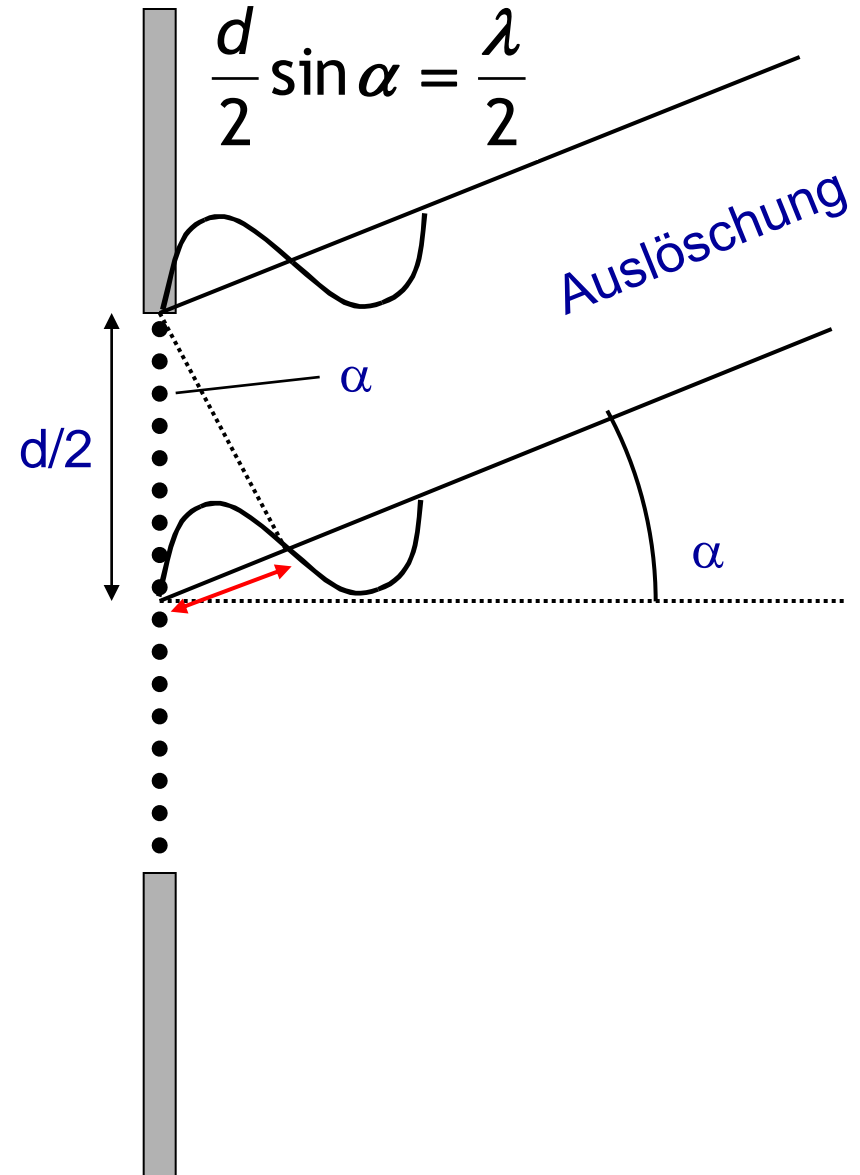
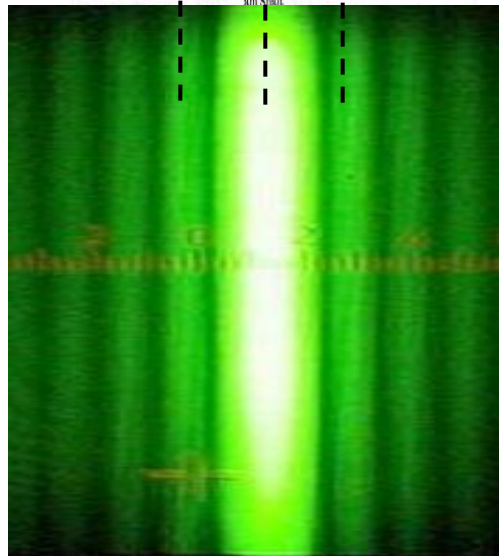
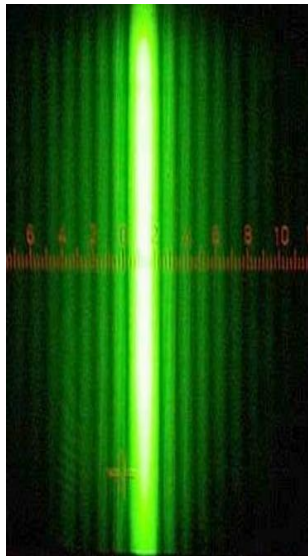
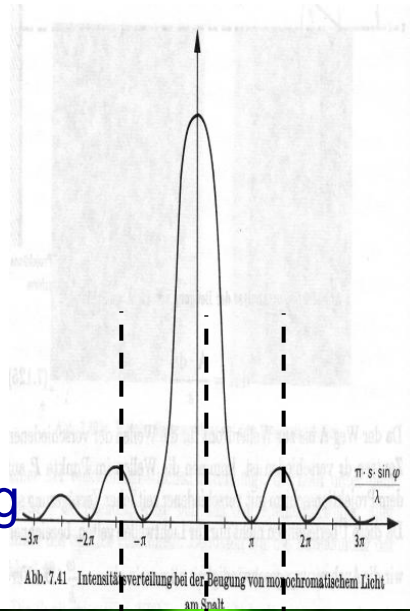
15 Spalte



Beugung am Einzelspalt

$$d \approx \lambda$$

Beugungsbild und
Intensitätsverteilung



Beugung am Einzelspalt

Beugungsmaxima:

$$d \sin \alpha = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Beugungsminima:

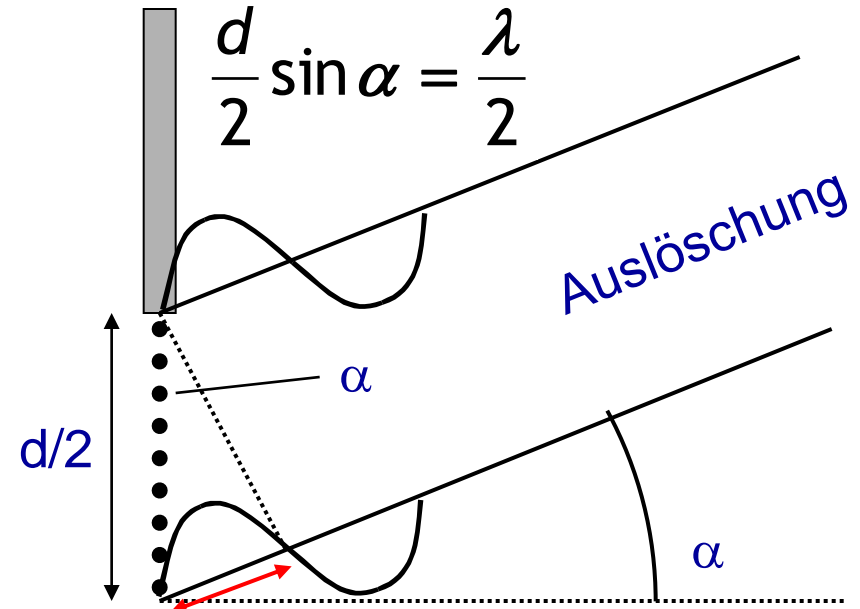
$$d \sin \alpha = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

aber Maximum bei $n=0$



Beachte:
Formeln genau
umgekehrt wie
bei Doppelspalt
und Gitter!

Bem.: Mathematisch
Fourier-Analyse der
Öffnung bzw. Blende



Analog auch Auslöschung bei

$$\frac{d}{4} \sin \alpha = \frac{\lambda}{2}, \frac{d}{6} \sin \alpha = \frac{\lambda}{2}, \dots$$

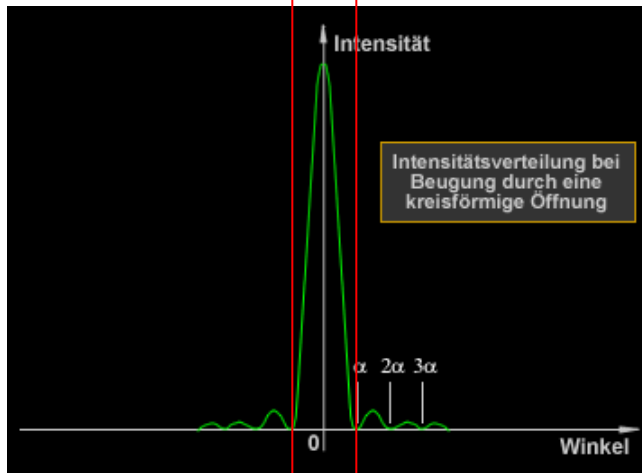
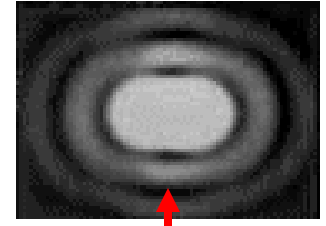
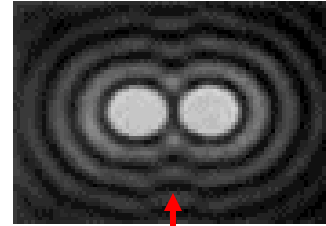
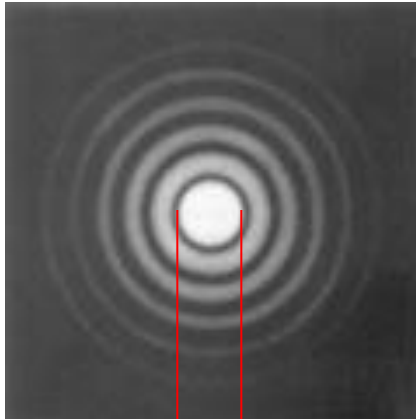
Aber Maxima bei

$$\frac{d}{3} \sin \alpha = \frac{\lambda}{2}, \frac{d}{5} \sin \alpha = \frac{\lambda}{2}, \dots$$

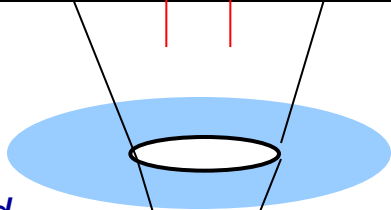
sowie ein zentrales
Maximum bei $\alpha = 0$!

Beugung

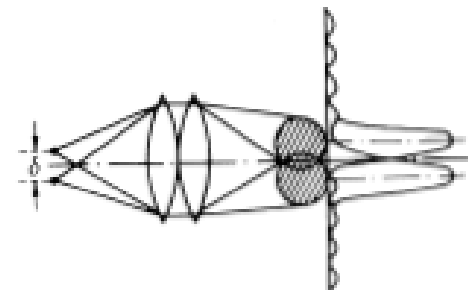
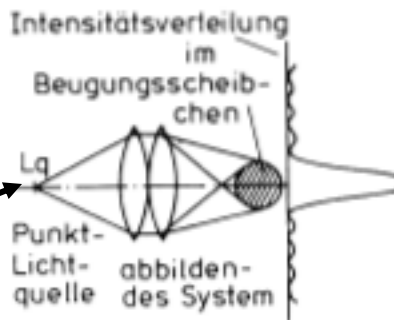
Beugungsbild



Loch-
blende:
Durch-
messer d



Punktlicht-
quelle



$\alpha > \alpha_c$: 2 getrennte Objekte

$\alpha < \alpha_c$: 2 nichtgetrennte Objekte

$\alpha_c = 1.22 \frac{\lambda}{d}$ Rayleigh-Kriterium:
Zwei Punkte können dann noch räumlich aufgelöst werden, wenn das zentrale Maximum der einen Beugungsscheibe in das erste Minimum der zweiten fällt.

Auflösungsvermögen

Für die **Auflösung einer Struktur** müssen neben der null-ten Beugungsordnung (zentrales Maximum) mindestens auch die Beugungsmaxima der ersten Ordnung (Nebenmaximum) in das Objektiv des Mikroskops einfallen können.

- 0. Ordnung: Helligkeitsinformation
- 1. Ordnung: Strukturinformation (grob)
- 2. Ordnung: Strukturinformation (feiner)
- etc.

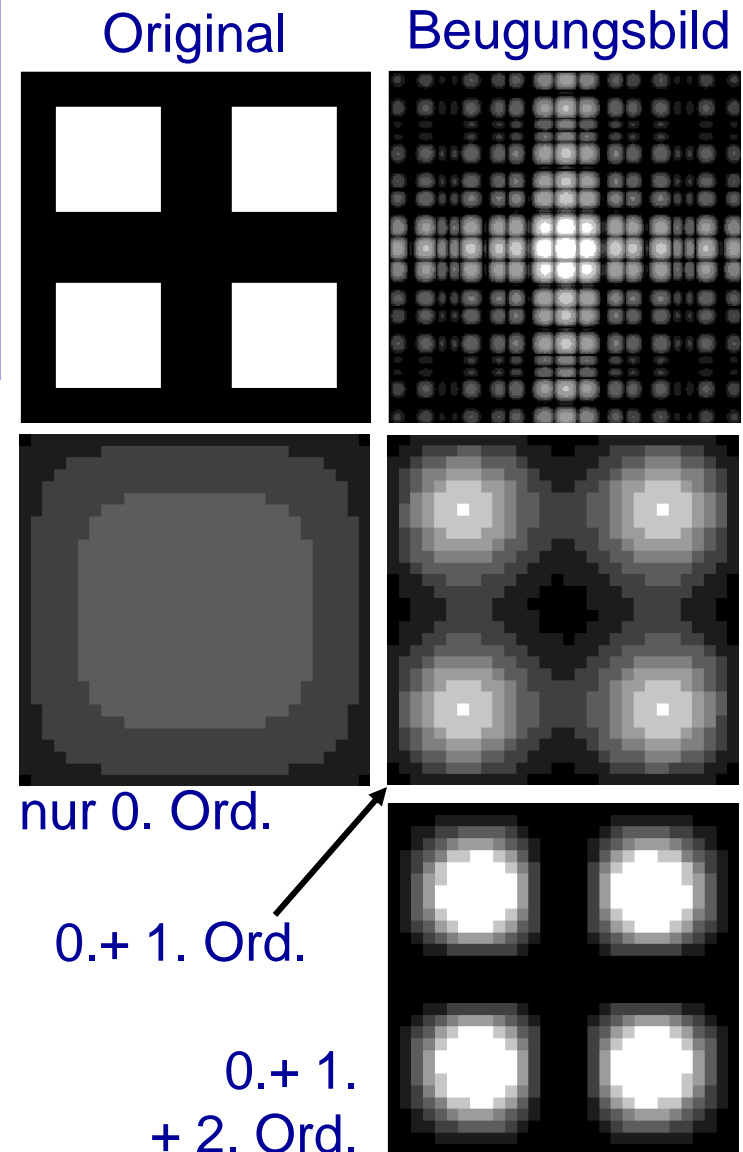
Auflösung bei:

Lichtmikroskopie $\Delta s = 300 \text{ nm}$

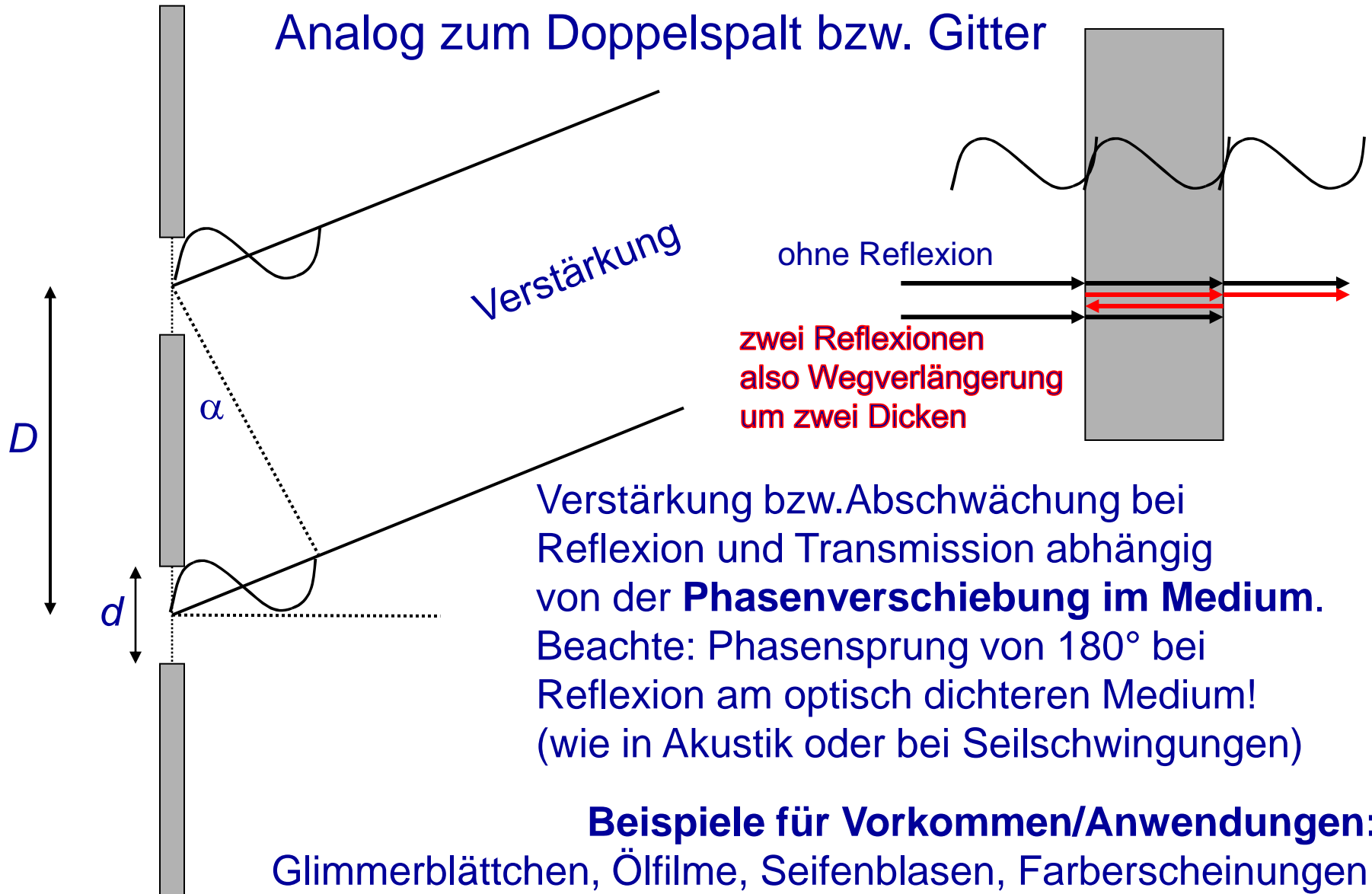
Immersionsmikroskopie $\Delta s = 200 \text{ nm}$

Konfokale Mikroskopie $\Delta s = 10 \text{ nm}$

Elektronenmikroskopie $\Delta s = 0,3 \text{ nm}$



Interferenzen an dünnen Schichten



Beispiele für Vorkommen/Anwendungen:
Glimmerblättchen, Ölfilme, Seifenblasen, Farberscheinungen bei Insekten, z.B. Schmetterlingen, Brillen-Entspiegelungen

Polarisation

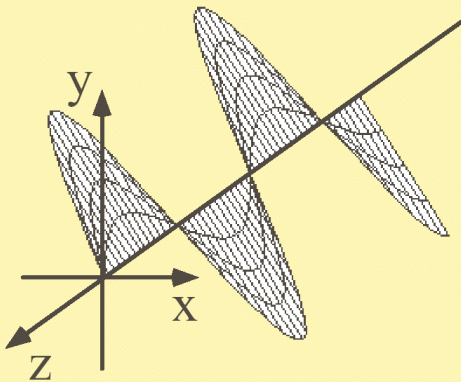
Licht ist **Transversalwelle**

Schwingungsrichtung von E-Feldvektor und H-Feldvektor sind **senkrecht** zur Ausbreitungsrichtung
Polarisationsrichtung: Schwingungsrichtung des E-Feldvektors.

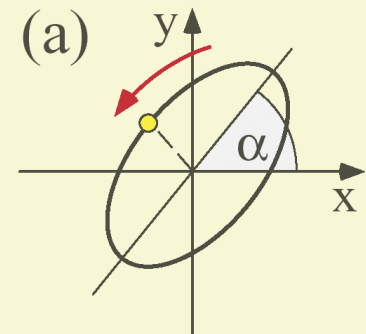
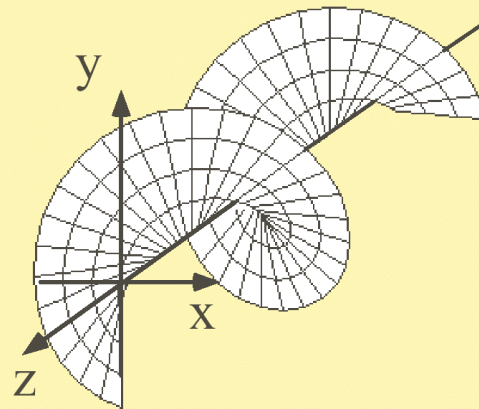
Polarisation

durch Dichroismus (unterschiedliche Absorption, „Polaroid-Filter“),
Doppelbrechung (Nicol-Prisma) oder Reflexion (Brewster)

Linear polarisierte Welle



Zirkular polarisierte Welle



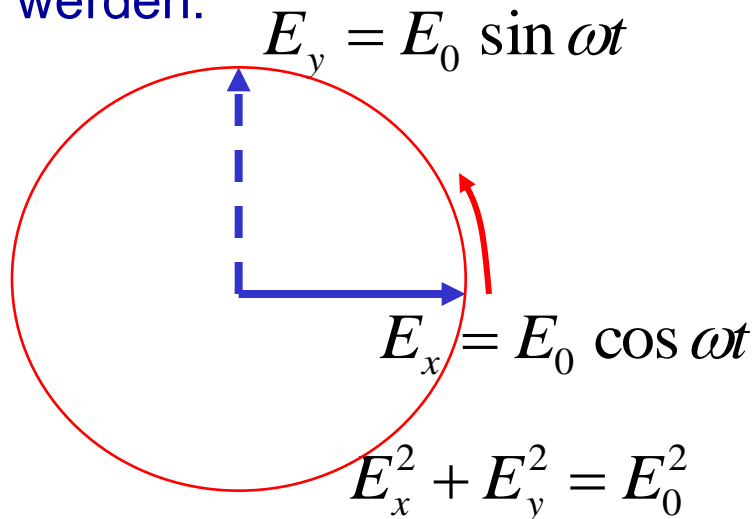
Elliptisch polarisiertes Licht

Zirkulare Polarisation

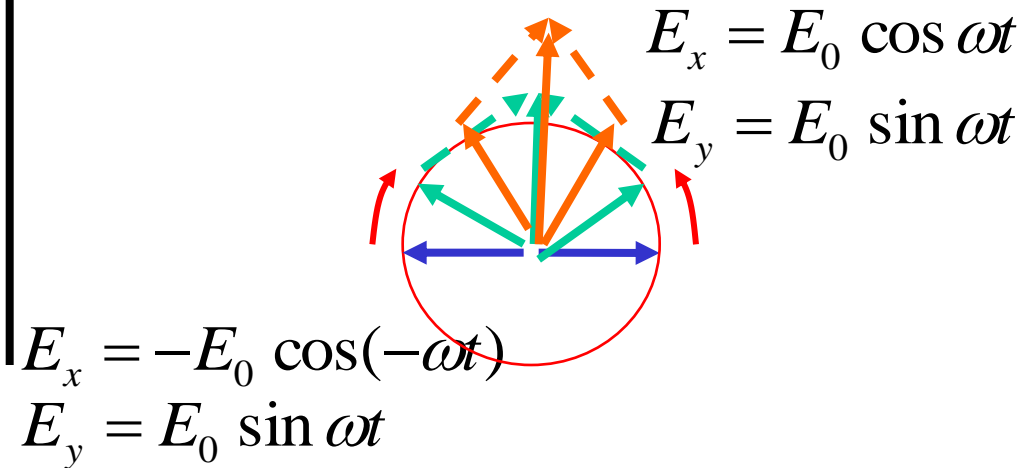
Zirkular und linear polarisierte Lichtstrahlen

sind **nichts völlig verschiedenes!**

Zirkulares Licht kann aus linear polarisiertem Licht zusammengesetzt gedacht/gemacht werden:



Umgekehrt können zwei gegenläufige zirkular polarisierte Anteile eine lineare Polarisation ergeben:



„Doppelbrechung“: In bestimmten Materialien haben Strahlen unterschiedlicher Polarisationsrichtungen unterschiedliche Geschwindigkeiten.

=> Mit doppelbrechenden Materialien kann die Polaritätsart verändert werden.

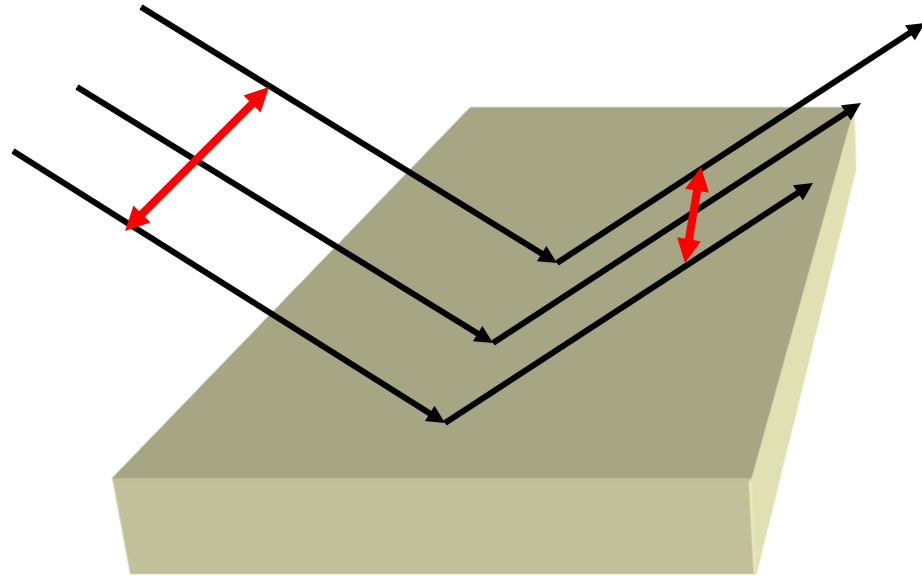
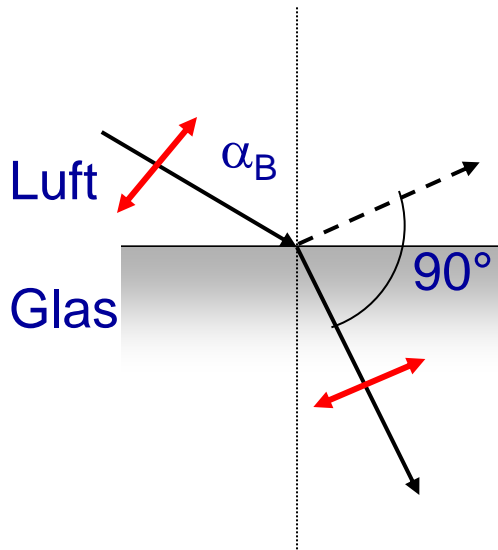
Beispiel: Bei „Lambviertel-Plättchen“ wird aus linear pol. Licht zirkular pol. Licht. (Beachte: Die Dicke ist **nicht** $\lambda/4$!)

Polarisation durch Reflexion

Brewster-Winkel α_B : $\tan \alpha_B = n$

Bem.: Folgt aus Snellius
und $\alpha_1 + \alpha_2 = 90^\circ$

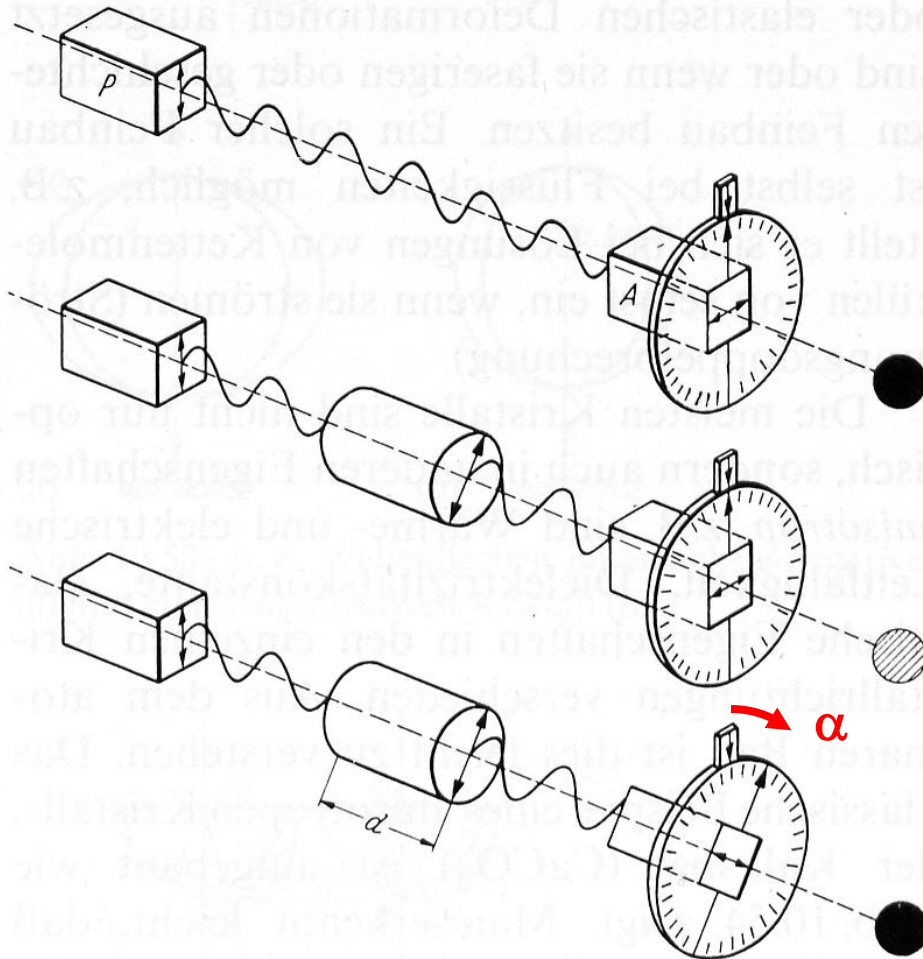
→ Reflektiertes Licht
ist vollständig polarisiert!



E -Feldvektor parallel zur
(also Vektor in der)
Einfallsebene und $\alpha = \alpha_B$:
Licht wird transmittiert, aber
kein Licht wird reflektiert !

E -Feldvektor senkrecht
zur Einfallsebene und $\alpha = \alpha_B$:
Licht wird (auch) reflektiert
⇒ Das reflektierte Licht
ist vollständig polarisiert.

Polarimetrie



Drehung der Polarisationssebene durch optisch aktive Substanzen (asymmetrische Moleküle z.B. Zucker)

Drehwinkel $\alpha = \alpha_0 C d$

α_0 heißt spezifische Drehung

Genauer α abhängig von:

- Wellenlänge des Lichtes
- Konzentration des Stoffes, C
- Lösungsmittel
- Temperatur
- optische Weglänge i. d. Probe

Faraday-Effekt: „künstliche“ Asymmetrie durch ein Magnetfeld => auch Polarisationsdrehung

Gesetz von Malus

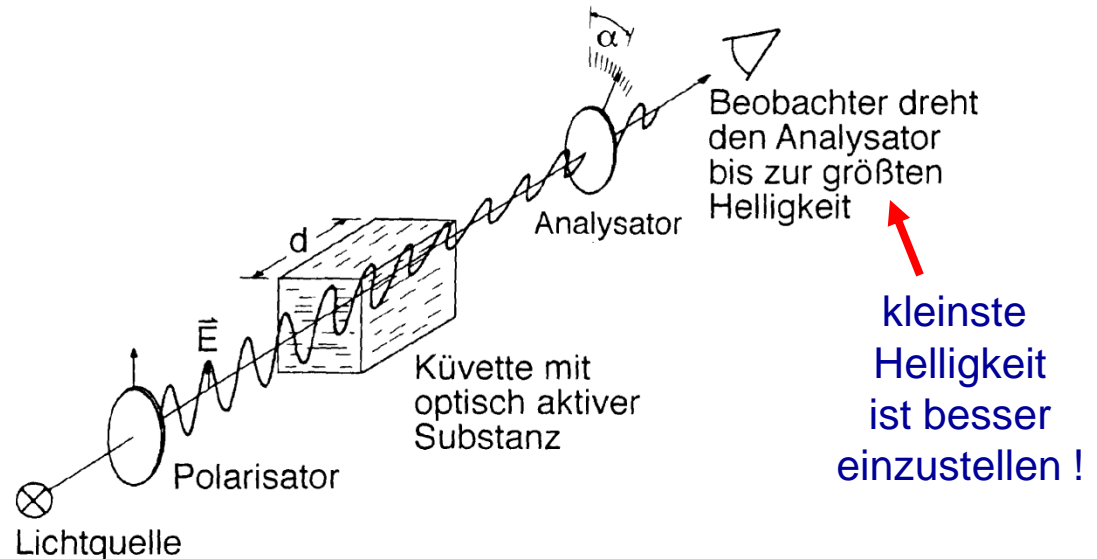
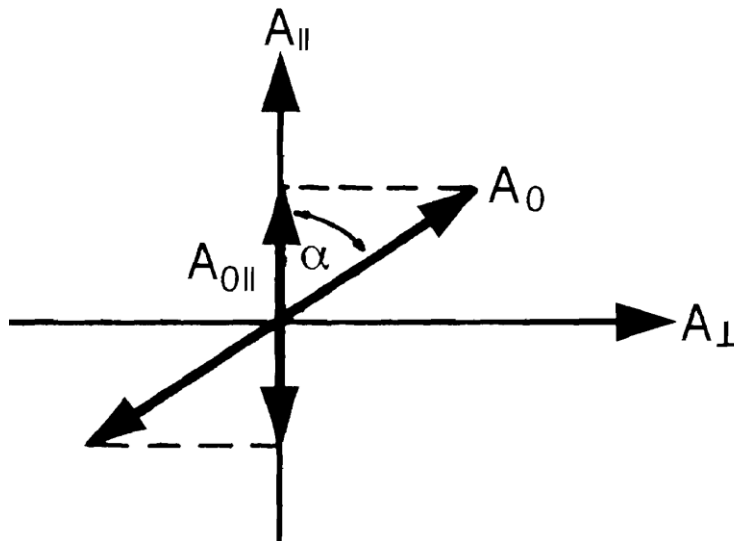
Durchgelasse und Anfangs-Amplitude verhalten sich wie

$$A_d = A_0 \cos \alpha$$

⇒ für Intensitäten
 $I \sim A^2$

⇒ Gesetz von Malus

$$I_d = I_0 \cos^2 \alpha$$

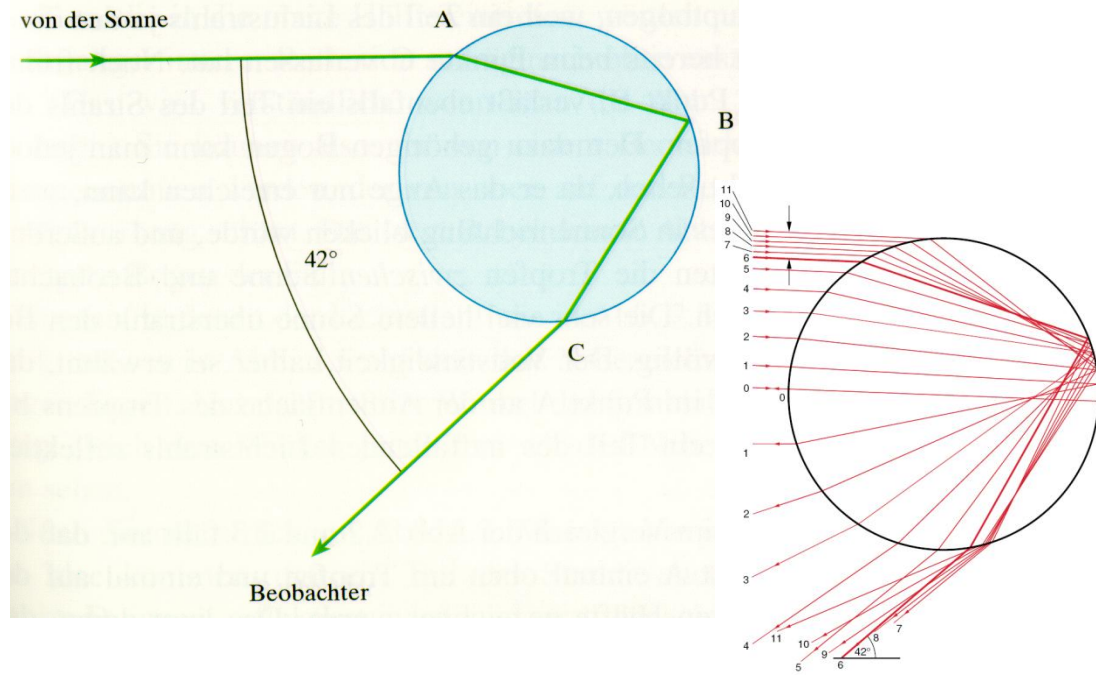


Lattenzaun-Analogon (Welle auf Seil)

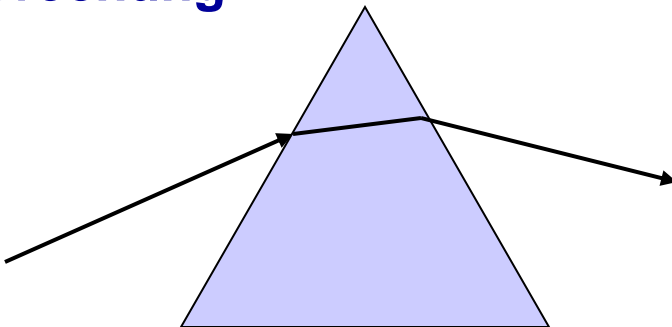
Beachte aber
Mikrowellenversuch mit Drahtgitter:
Bei elektr. Feld in Stabrichtung
Absorption und Reflexion!

Prisma und Regenbogen

Regenbogen: Reflexion und Brechung am Regentropfen

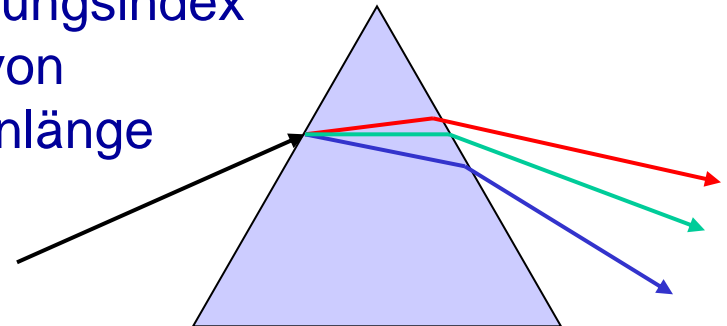


Brechung



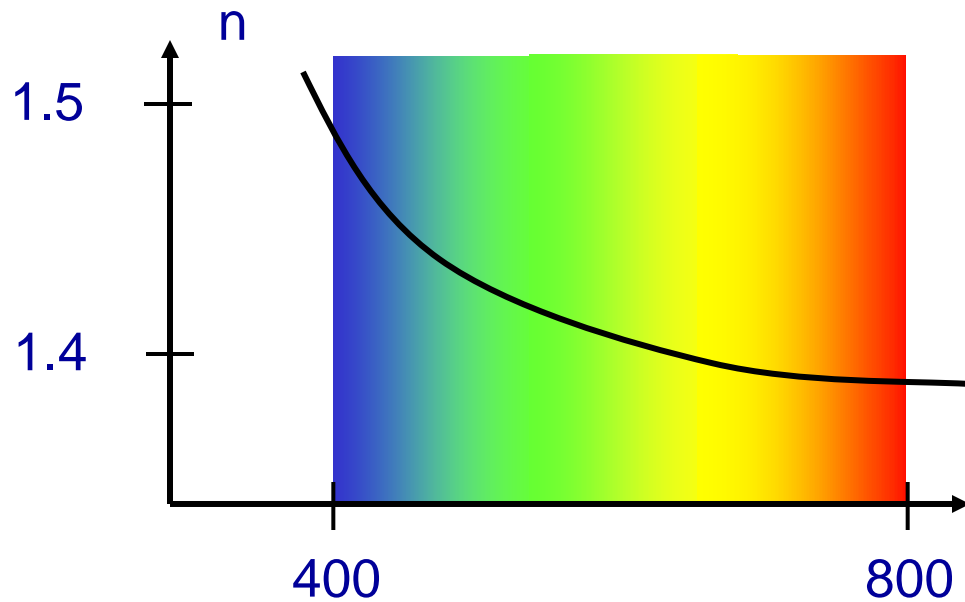
Dispersion: $n = n(\lambda)$

Brechungsindex
abh. von
Wellenlänge



spektrale Zerlegung des Lichtes

Dispersion



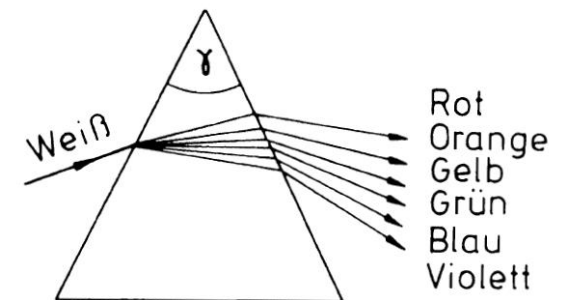
Dispersion: $\frac{dc}{df} \neq 0$

Lichtgeschwindigkeit abhängig von Frequenz (oder Wellenlänge)

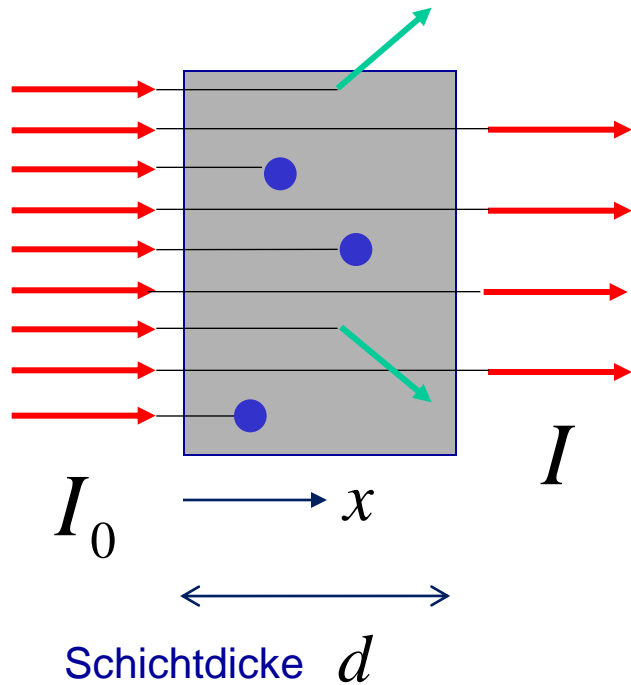
λ/nm

normale Dispersion: $\frac{dn}{df} > 0$ i.e. $\frac{dn}{d\lambda} < 0$

anomale Dispersion:
(im Bereich von Absorptionslinien) $\frac{dn}{df} < 0$ i.e. $\frac{dn}{d\lambda} > 0$



Extinktion



Abschwächung der Lichtstrahlen
bei Transmission durch ein Medium

$$dI = -\mu I dx$$

Beer-Lambertsches Extinktionsgesetz:

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

$$\mu = \mu(\lambda, C)$$

Extinktion setzt sich zusammen aus

- Absorption** des Lichts durch die Moleküle/Atome des Mediums
(Dichroismus: Richtungs- und Polarisationsabhängigkeit der Absorption)
- Streuung** des Lichts an den Molekülen/Atomen des Mediums
(Auch die Streuung ist polarisationsabhängig.
Beispiel: Himmelsblau/Abendrot)

Tyndall-Effekt: Streuung von Licht an kolloidalen Systemen

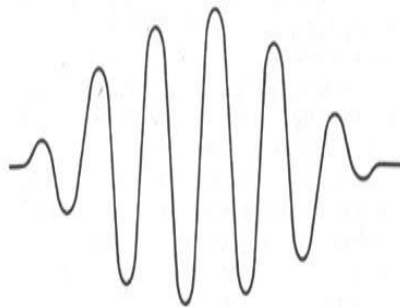
(z.B. Staub in Luft, gestreutes Licht ist im Allg. polarisiert)

Laser / Welle-Teilchen-Dualismus

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

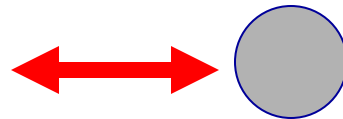


$$\lambda \leftrightarrow 1/\nu$$



a wave packet corresponding to a particle located somewhere in the region X

$$E = h\nu$$



Welle-Teilchen-Dualismus:

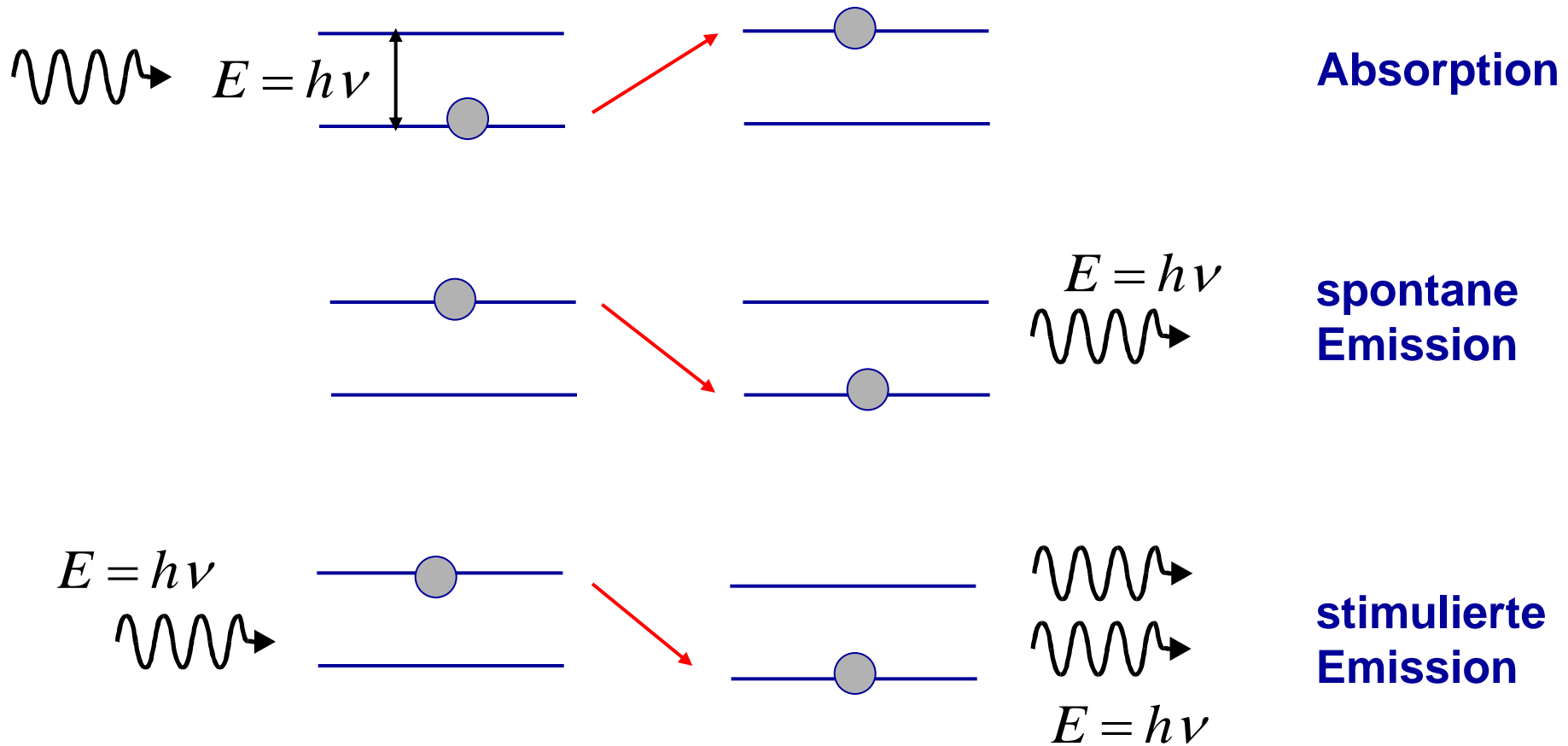
Bei Emissions- und Absorptionsvorgängen wirkt Licht wie ein Strom von Teilchen, den **Photonen**, mit der Energie $E=h \cdot f$

Energiequantum $E=h \cdot f$

Plancksches Wirkungsquantum h

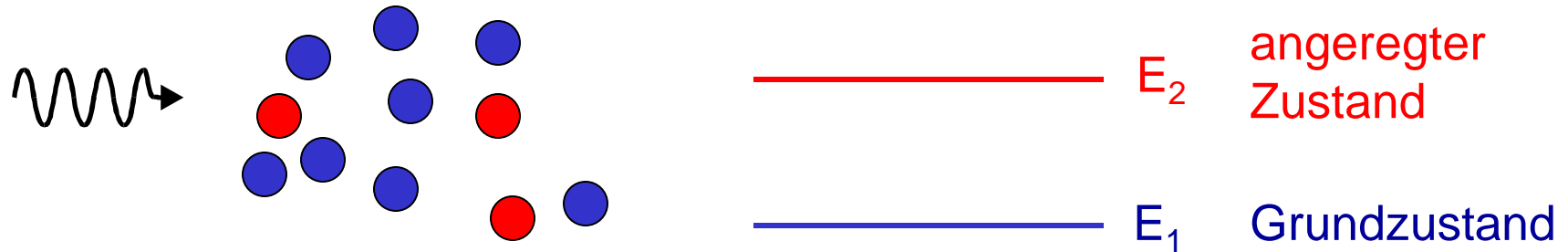
$h = 6.6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Laser / Elementarprozesse

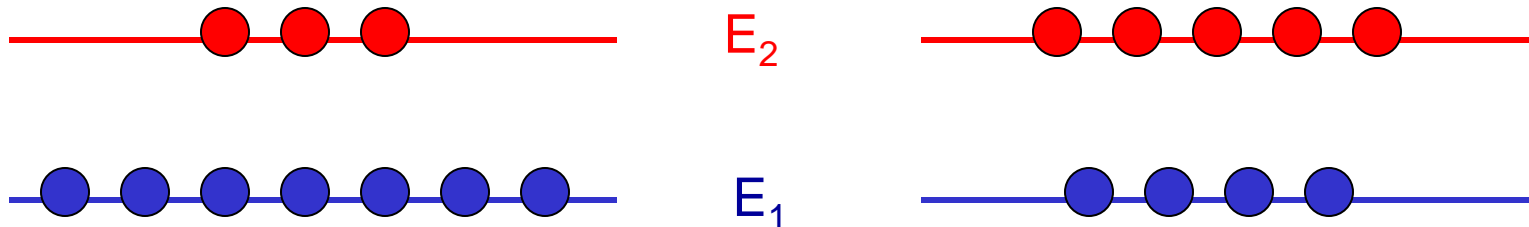


Laserlicht hat - **feste Frequenz** (Wellenlänge): monochromatisch
- **feste Phasenbeziehung**: konstruktive Überlagerung

Laser / Besetzungsinversion



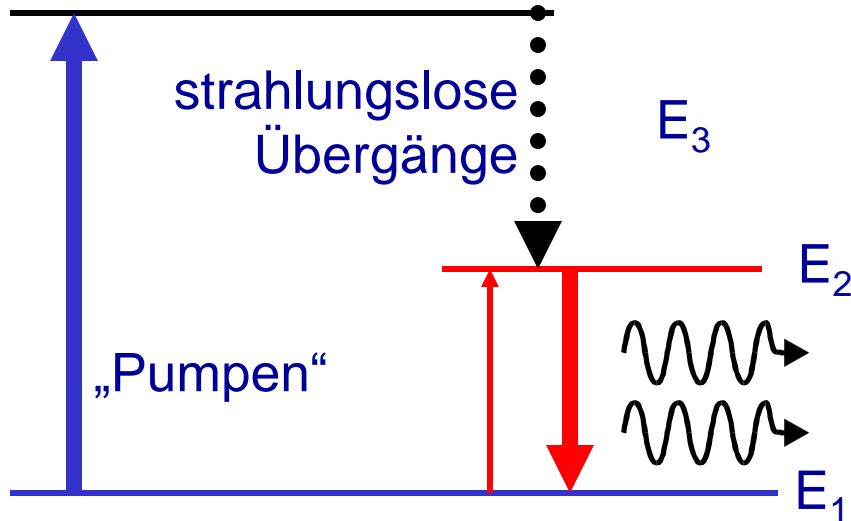
Im thermodynamischen Gleichgewicht: Anzahl N_1 der Atome im Grundzustand E_1 höher derer (N_2) im angeregten Zustand E_2 , d.h. $N_1 > N_2$ und daher: Absorption aus Grundzustand überwiegt stimulierte Emission aus angeregtem Zustand



thermodynamisches Gleichgewicht,
d.h. Boltzmann-Verteilung
mit $N_1 > N_2$

benötigt für Laser
Besetzungsinversion:
 $N_2 > N_1$

Drei-Niveau-Laser / Resonator



Prinzip eines Drei-Niveau-Lasers
z.B. He-Ne-Laser

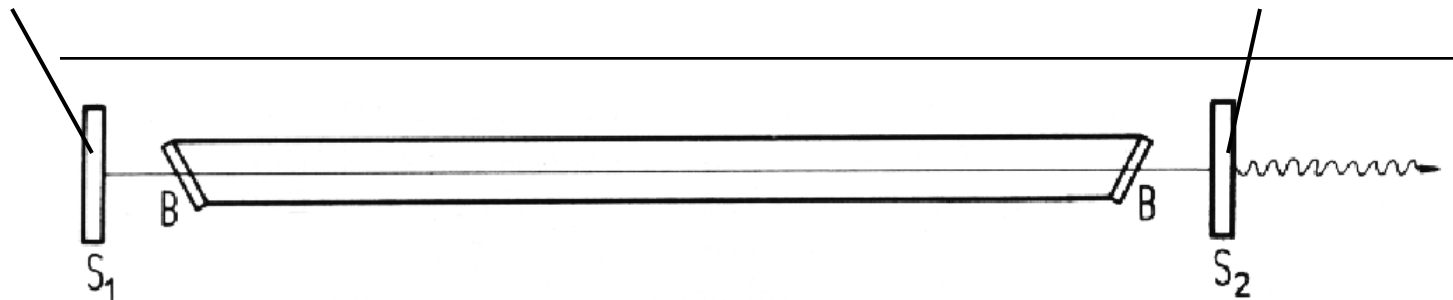
Besetzungsinversion:

- optisches Pumpen
- Stoßanregung
- Strom durch pn-Übergang
- chemisches Pumpen

Laser:

- stimulierte Emission bei Besetzungsinversion
- Resonator

vollständig
reflektierend



zu ca. 98%
reflektierend

Laser in der Medizin

Laserlicht:

- extrem intensiv
- monochromatisch
- kohärent
- gebündelt

Thermochemische Prozesse: Laserchirurgie
(Koagulieren, Schneiden, Verdampfen)

Photochemische Reaktionen: Photochemotherapie (Nekrotisieren)

Mechanische Effekte (optischer Durchschlag):
Laserchirurgie, Mikrochirurgie



LASIK
(Laser In Situ
Keratomileusis)
„refraktive
Chirurgie“



**Tattoo-
Entfernung**

Laser-Klassen

entsprechend der schädlichen biologischen Wirkung von Laserstrahlung

Laser werden in Geräteklassen eingeteilt.

Es gibt verschiedene Klassifizierungen. Nach EN 60825-1 gilt:

Klasse	Beschreibung
1	ungefährlich (CD-Player; CD-/DVD-Brenner mit geschlossenem Gehäuse)
2	Strahlung nur im Sichtbaren und wenn kurzzeitig ($< 0,25\text{s}$) auch für Auge ungefährlich; Stichwort: Lidschlussreflex, aber: tritt anscheinend bei meisten Personen NICHT ein! (Laser-Pointer!)
3	gefährlich für Auge (3R) und Haut (3B); diffuses Streulicht in der Regel ungefährlich
4	sehr gefährlich für Auge, gefährlich für Haut auch diffuses Streulicht evtl. gefährlich für Auge! evtl. Brand- oder Explosionsgefahr