

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 $A = \lg(I_0/I)$], 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

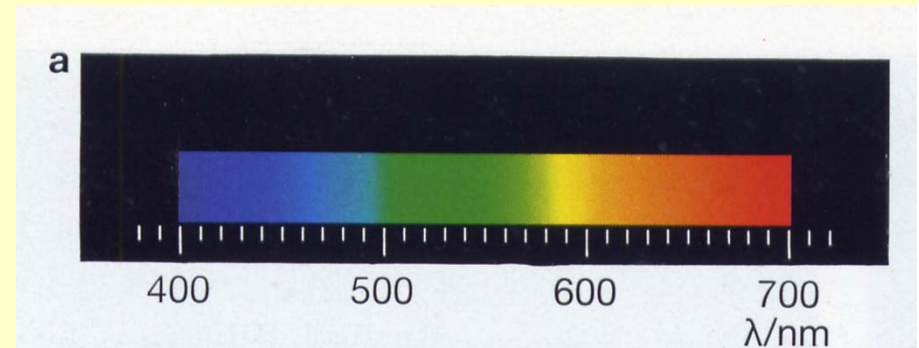
Licht ist elektromagnetische Welle.

sichtbares Licht: Wellenlänge

Wellenlänge λ von etwa 0,4 bis 0,7 μm

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

Die genauen Buchangaben schwanken!



$$c = f \cdot \lambda$$

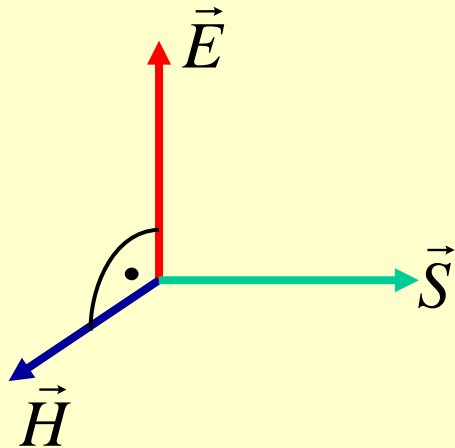
$$= 2.997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

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

Lichtstrahlen breiten sich
geradlinig aus!

Wirklich?

Energetische Größen

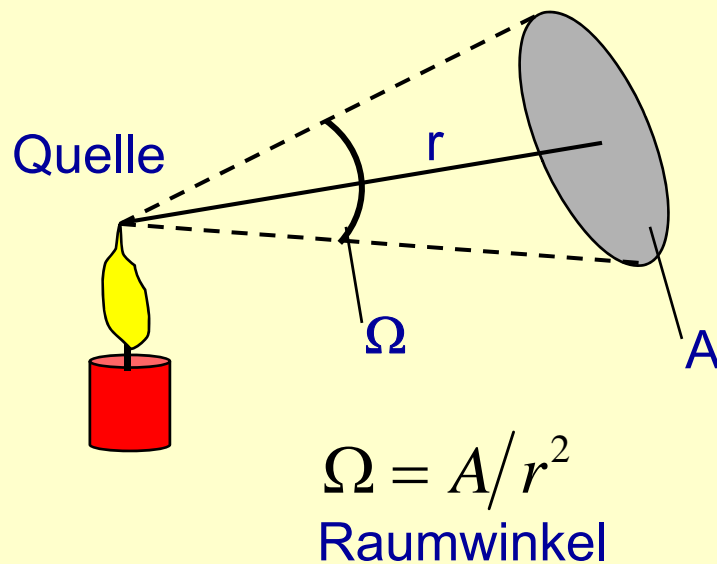


$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Energiestromdichte
(Poynting-Vektor)

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

ε : Energiedichte
in J/m³



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

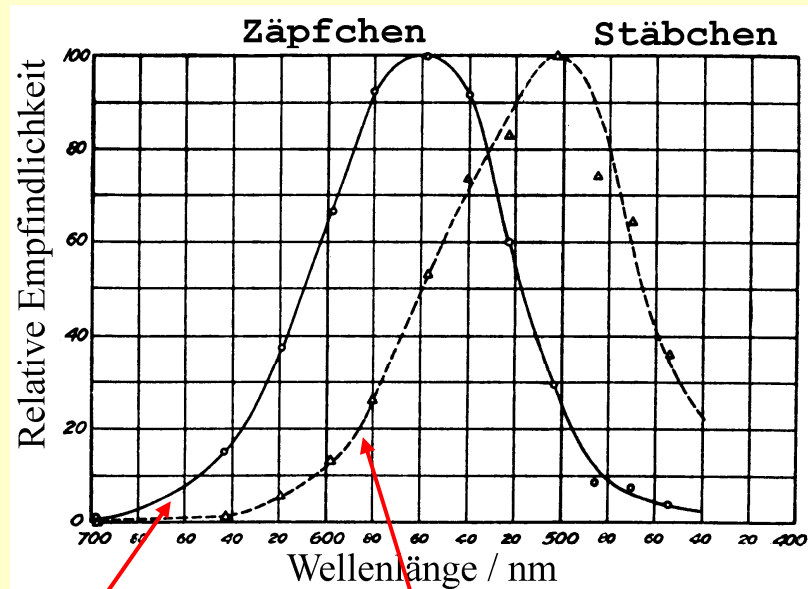
Strahlstärke $I = d\Phi/d\Omega$: Strahlungsfluß pro Raumwinkel (Watt/Steradian)

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. $V'(\lambda)$



Helladaptation
Maximum bei
555 nm (grün)

Dunkeladaptation
Maximum bei
507 nm
(türkis/blau)

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

absolute Empfindlichkeit

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

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

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

lm = cd · sr

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

Basiseinheit

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

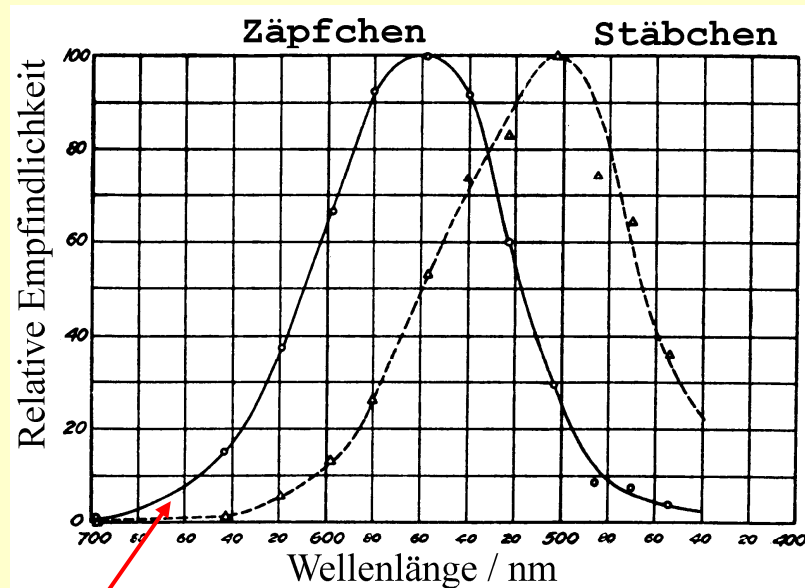
(Lux) lx = cd · sr/m²

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

sb = cd/m²

Photometrische Größen 2

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



Helladaptation
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:

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

Ein **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 Raumwinkelseinheit emittiert wird

Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken

Leuchtdichten (cd/m ²)		Beleuchtungsstärken (Lux)	
Nachthimmel	~10 ⁻³	Sonnenschein	5000 – 70000
Mond	~10 ³	bedeckter Himmel	900 – 2000
Sonne	~10 ⁹	Straßenbeleuchtung	0.5 – 30
Glühlampenkolben	□ 3 · 10 ⁵	Grobarbeitsplatz	50 – 100
Glühlampenwendel	0.5 - 3.5 · 10 ⁵	Feinarbeitsplatz	300 – 1000
Xe-Höchstdrucklampe	□ 10 ¹⁰	Feinstarbeitsplatz	1000 – 4000

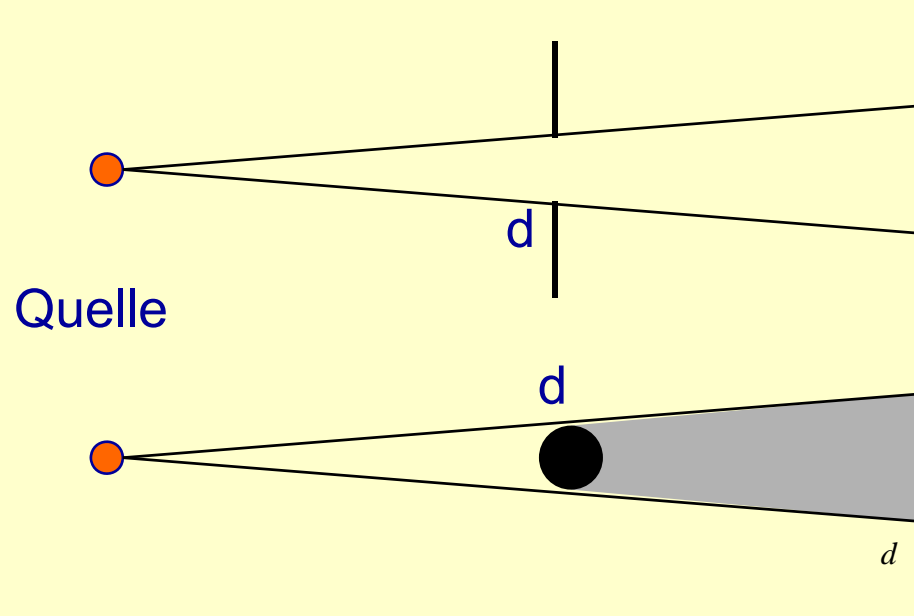
gesamte Leuchtdichte:

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

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.

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

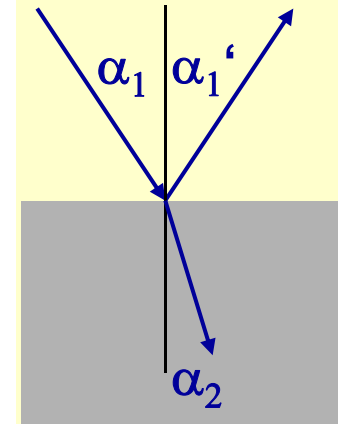
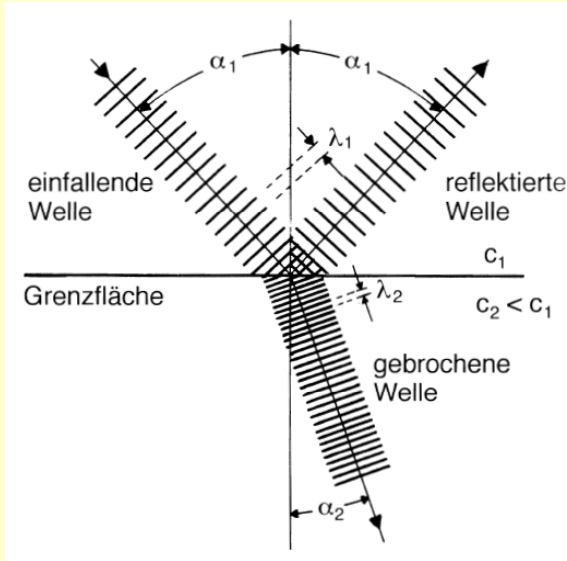
n : Brechungsindex
 $n \cdot s$: optische Weglänge

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



Medium 1
mit c_1

Medium 2
mit c_2

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

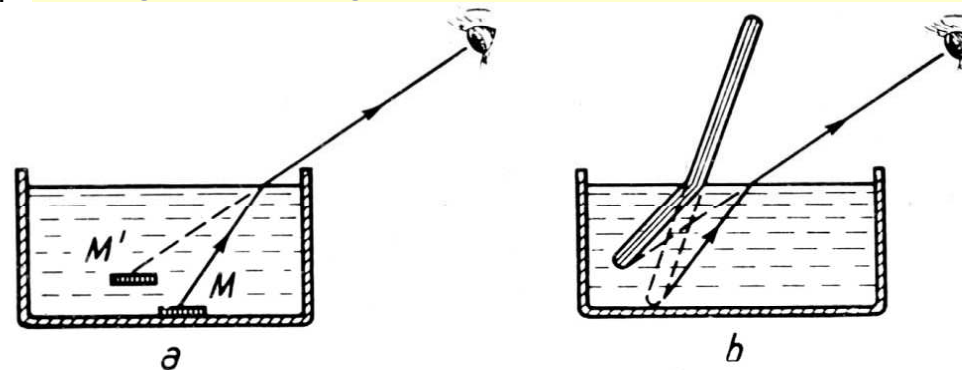


Abb. 36. Versuche zum Nachweis der Lichtbrechung

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

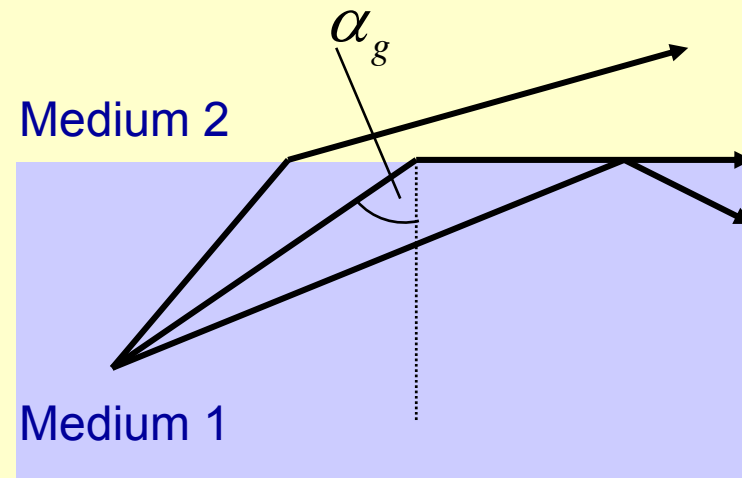
Totalreflexion

Totalreflexion

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

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

< 1



Für $\alpha_2 = 90^\circ$

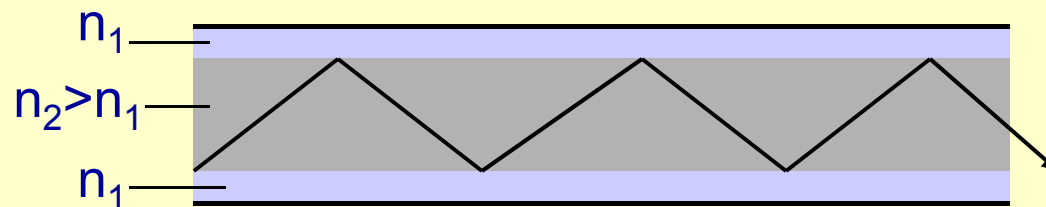
$$\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1}$$

Grenzwinkel der Totalreflektion

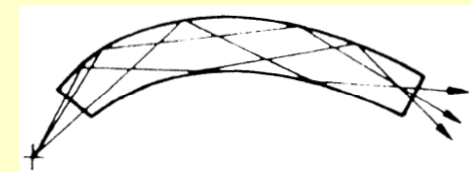
Für flachere Winkel $\alpha > \alpha_g$: vollständige Reflexion

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

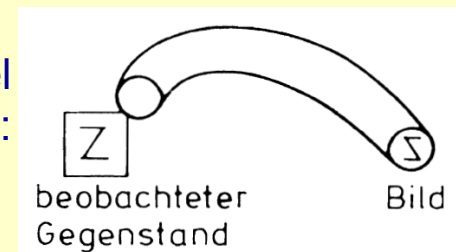
Lichtleiter



Datenübertragung:

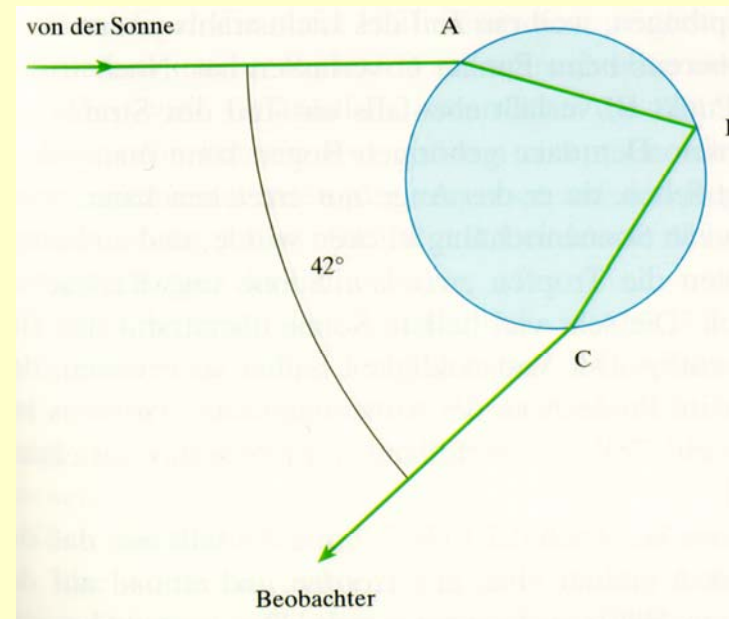


Faserbündel
=> Endoskopie:

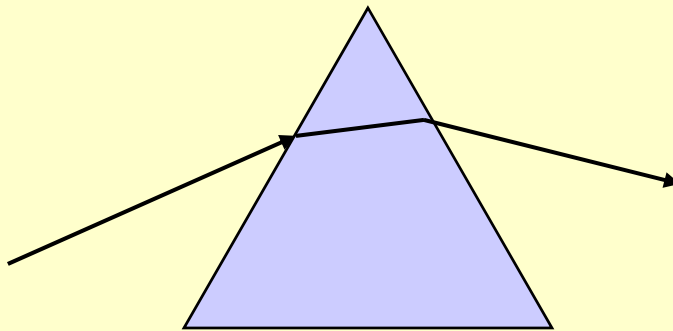


Prisma und Regenbogen

Regenbogen: Reflexion und Brechung am Regentropfen

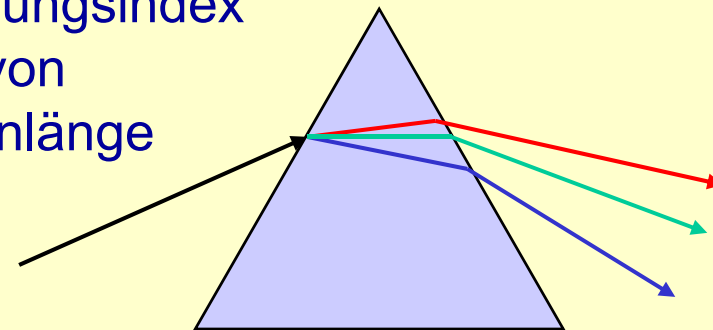


Brechung



Dispersion: $n = n(\lambda)$

Brechungsindex
abh. von
Wellenlänge



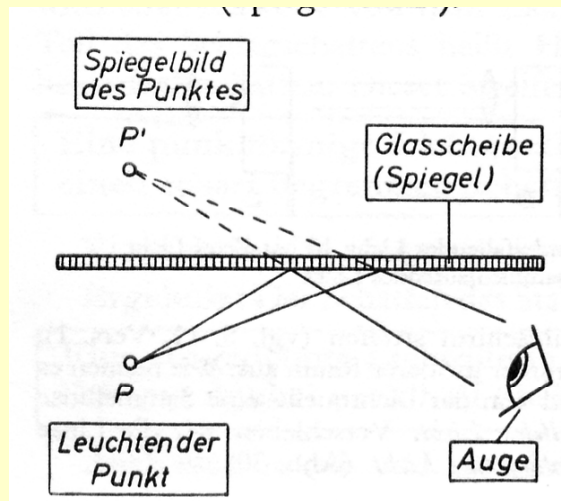
spektrale Zerlegung des Lichtes

Experimente zur Geometrischen Optik

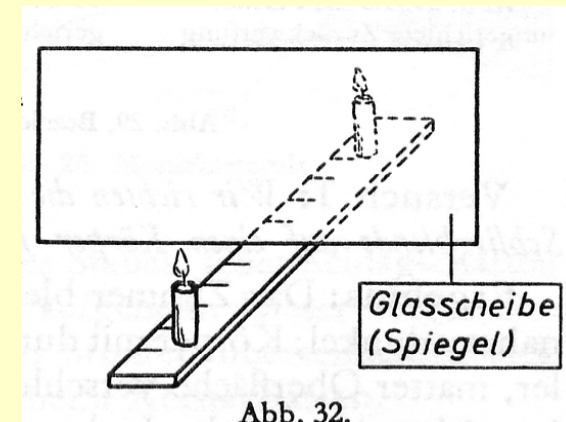
Experimente (Geometrische Optik):

- 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

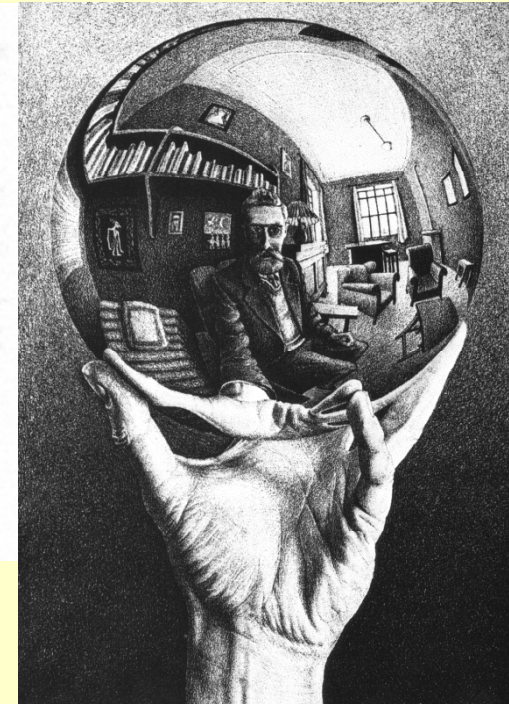
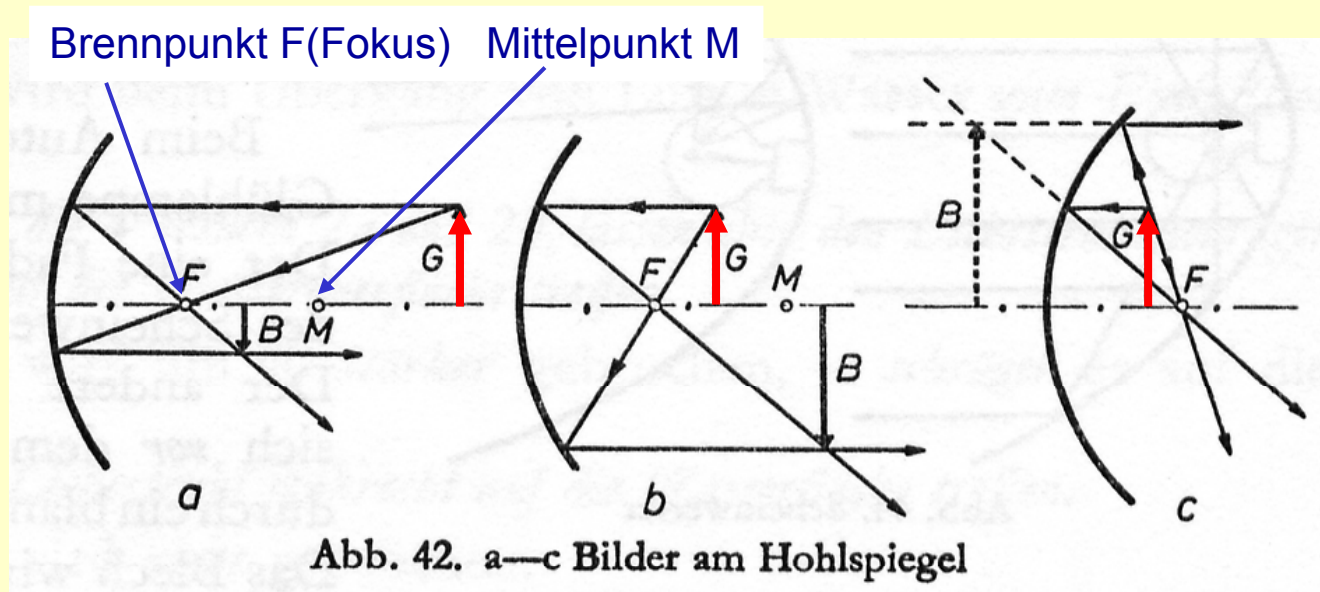


Reelles Bild kann auf Schirm abgebildet werden
Virtuelles Bild benötigt noch eine weitere Abbildung (z.B. durch Auge)



Spiegelung in
einer Pfütze

Hohlspiegel



Zahnarzt-Hohlspiegel

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

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

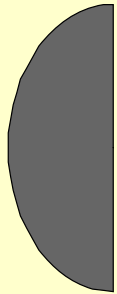
(Spiegelung jeweils an Tangente an Kreis)

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

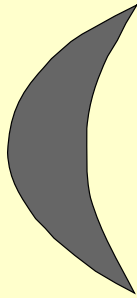
Abb. C: Virtuelles Bild ($b < f$; immer $B > G$)

Übersicht Linsen

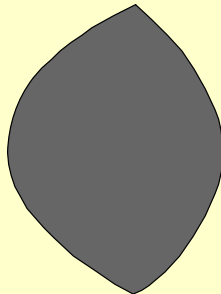
plan-
konvex



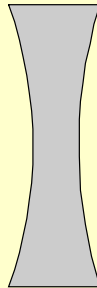
konkav-
konvex



bi-
konvex



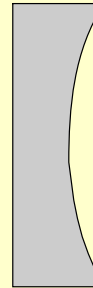
bi-
konkav



konvex-
konkav



plan-
konkav



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:

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

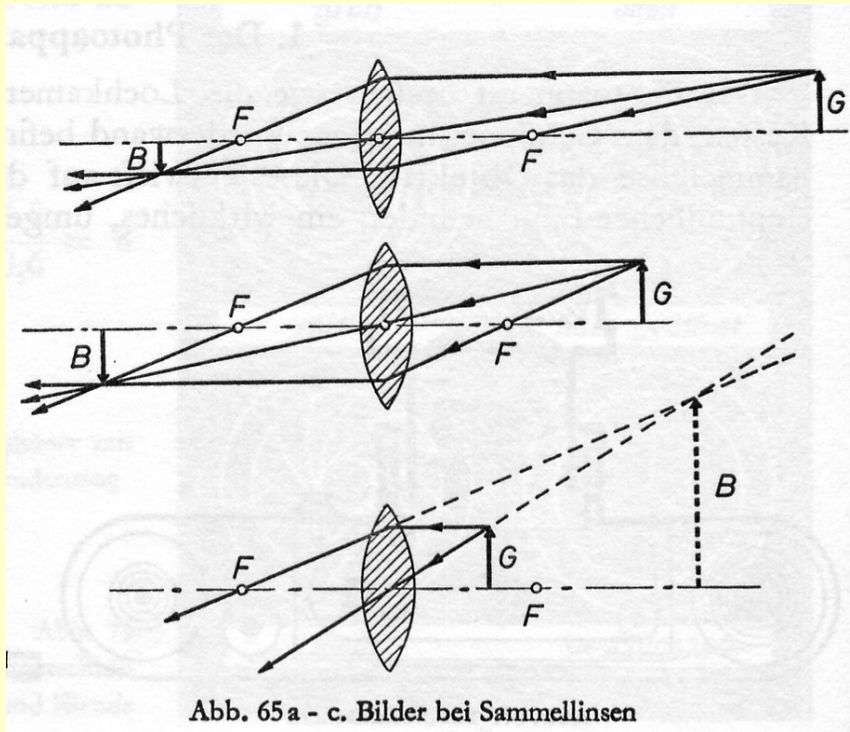
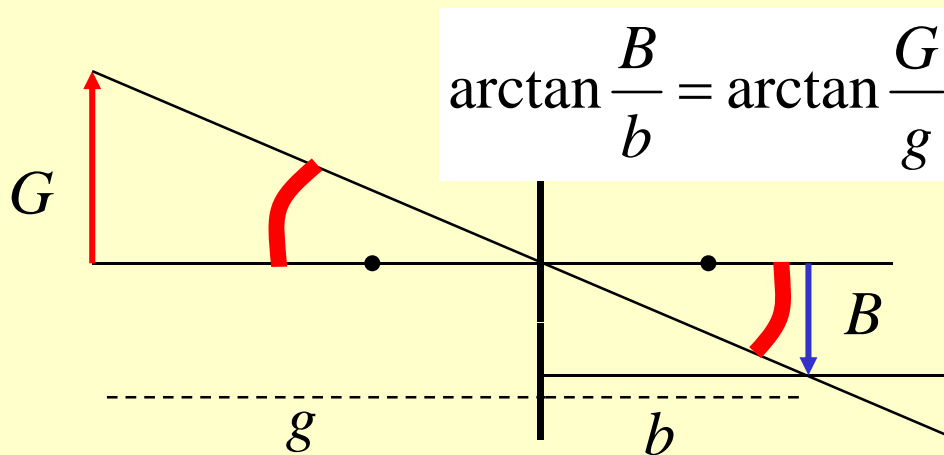
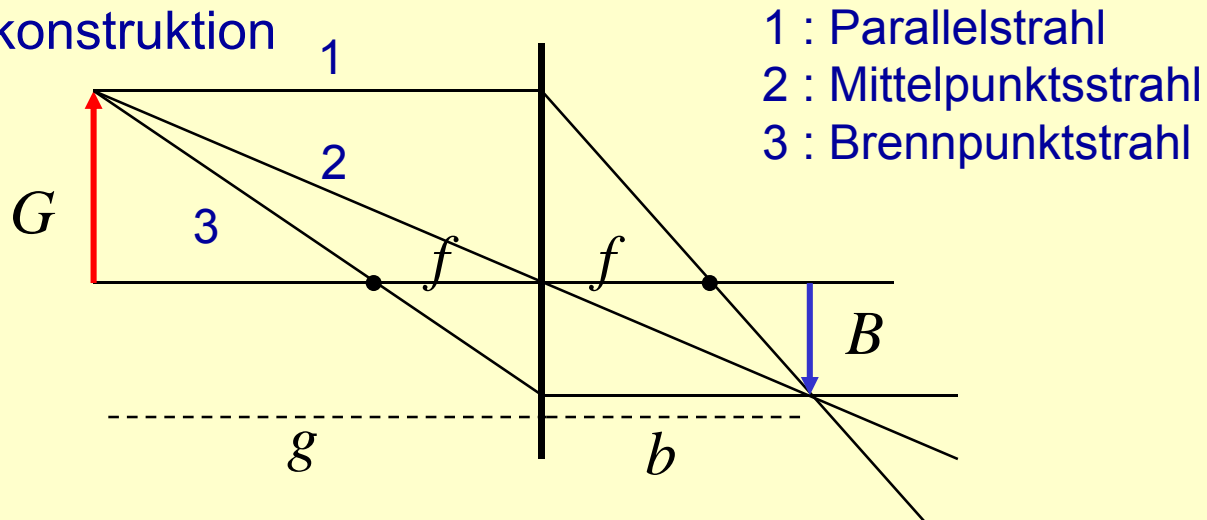


Abb. 65 a - c. Bilder bei Sammellinsen

Sammellinse 1

Bildkonstruktion



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

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

bzw.

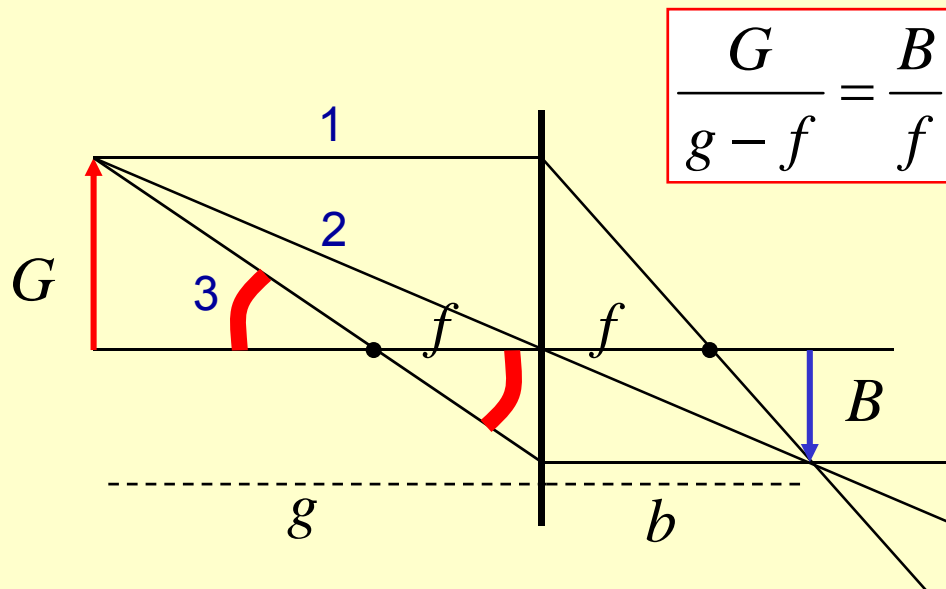
$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

Also Abbildungsmaßstab

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

Sammellinse 2

Bildkonstruktion



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

setze Abbildungsmaßstab

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

ein:

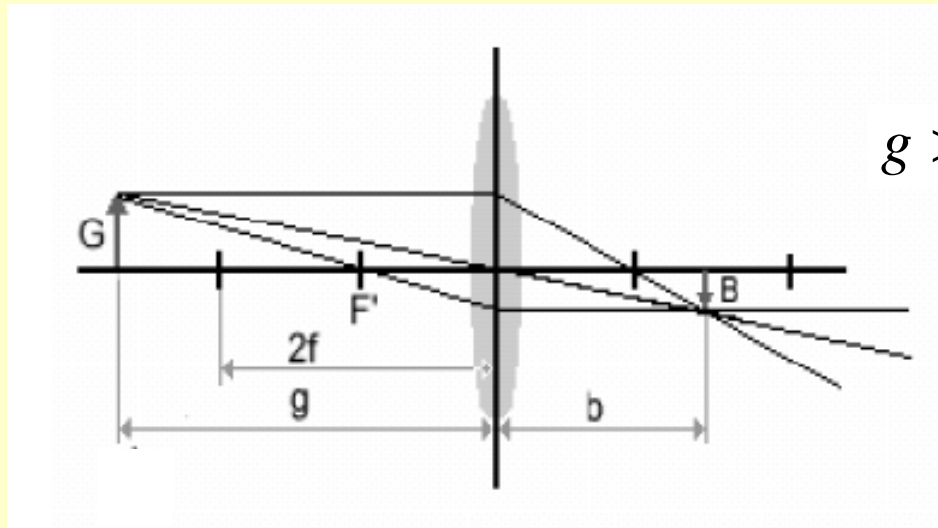
$$\frac{1}{g-f} = \frac{b}{g} \frac{1}{f}$$

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

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

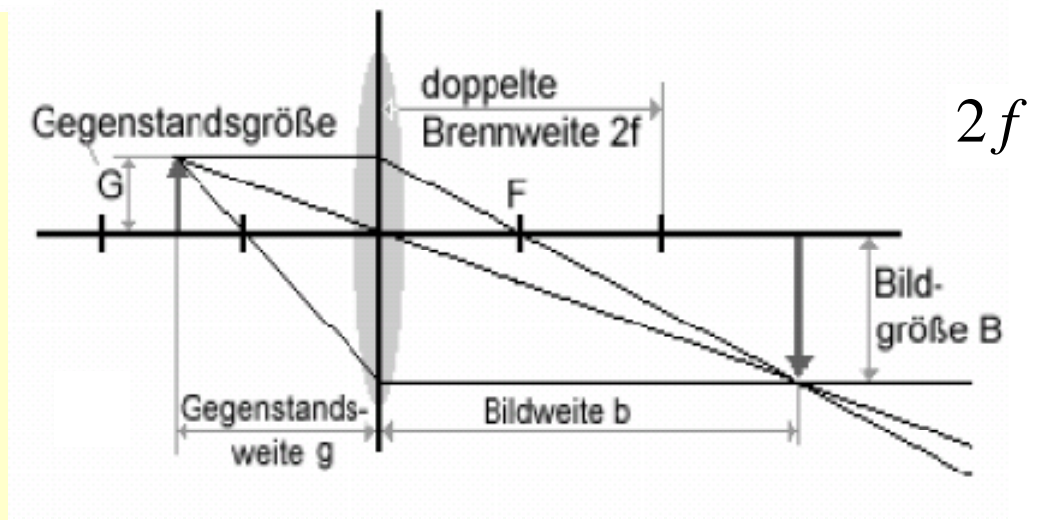
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

Sammellinse 3



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

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



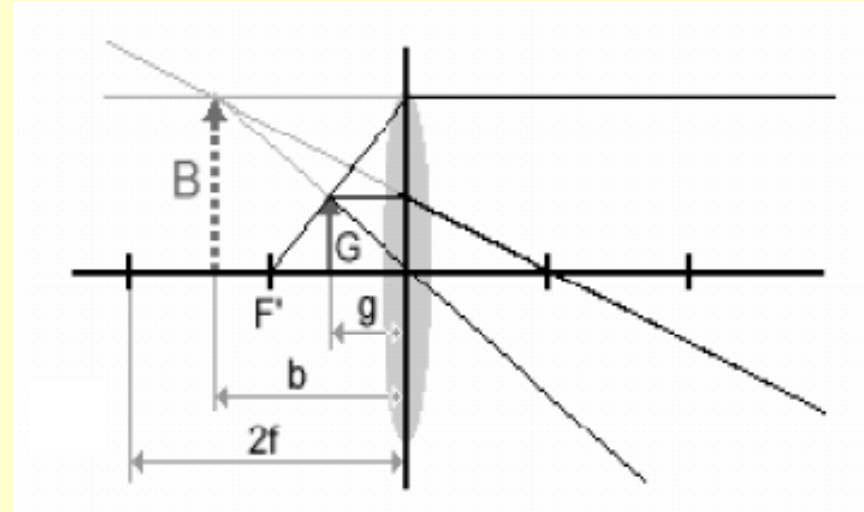
$$2f > g > f \Rightarrow B > G$$

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

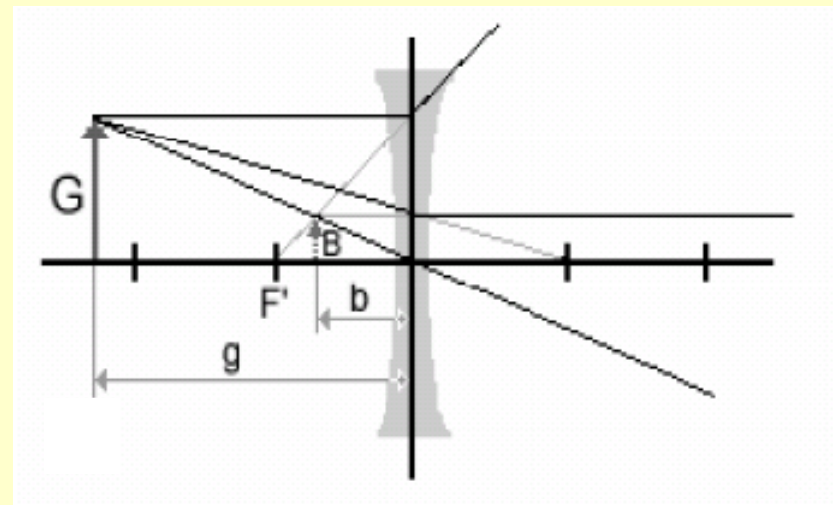
Virtuelle Abbildungen

bei Sammellinsen:

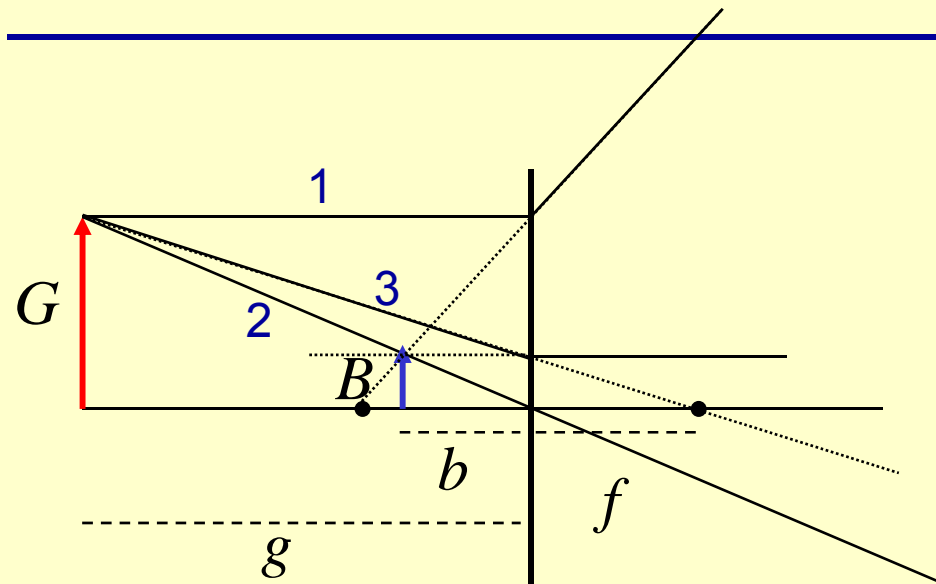
$$g \leq f$$



bei Zerstreuungslinsen:



Zerstreuungslinse



negative Brennweite!

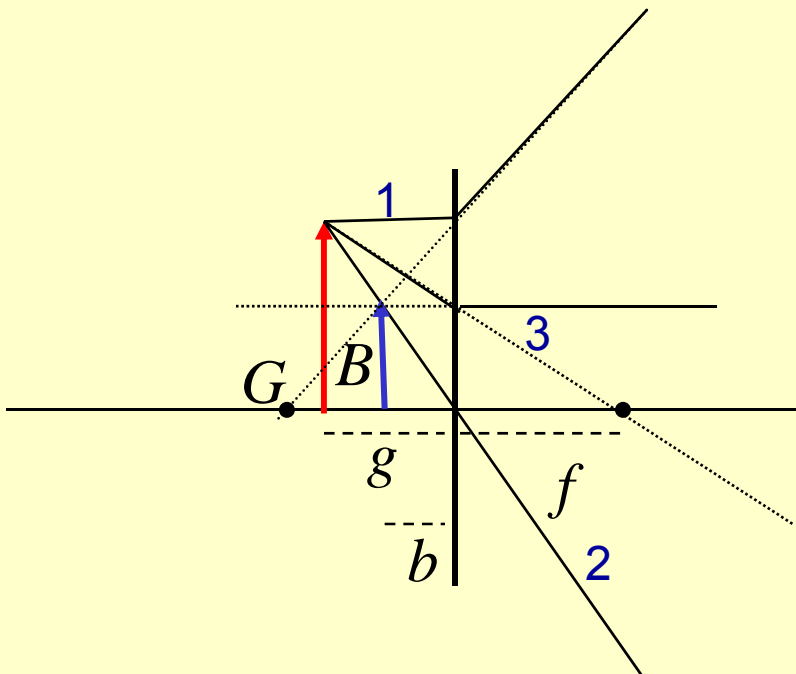
- 1 : Parallelstrahl
- 2 : Mittelpunktstrahl
- 3 : Brennpunktstrahl

**Rückwärtige Verlängerung
der Lichtstrahlen!**

Abbildungsmaßstab
wie gehabt:

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

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



Brechkraft und Linsenkombinationen

Die Brechkraft D in Dioptrien (dpt) ist Kehrwert der Brennweite in Metern.

Dünne Linsen in kleinem Abstand voneinander

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

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. $D_2 = -D_1$

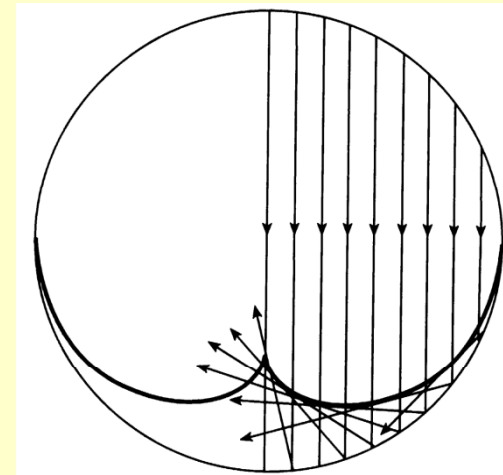
$$f = f_1^2 / d \quad \text{bzw.} \quad D = d D_1^2$$

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

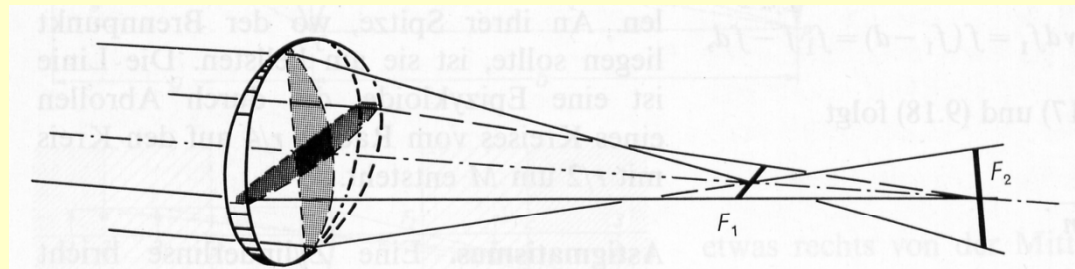
Weitere Linsenkombinationen bei
optischen Instrumenten (Mikroskop, Fernrohr)

Abbildungsfehler

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

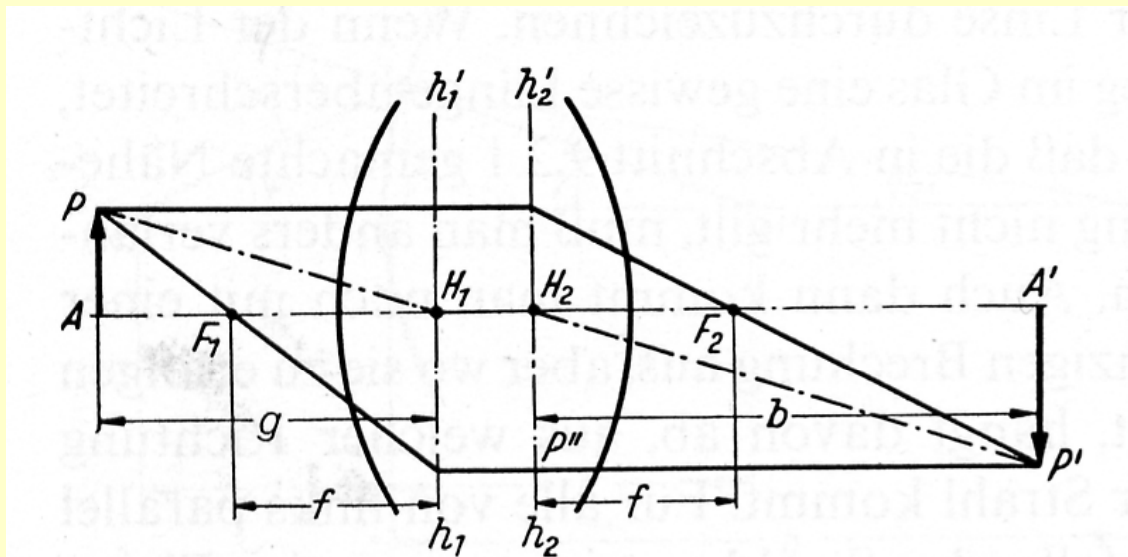


Astigmatismus: In zwei senkrechten Ebenen verschiedene Krümmungsradien und damit verschiedene Brennweiten (Extremfall: Zylinderlinse). Astigmatismus auch bei schrägem Einfall auf sphärische Linse.



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

Linsegleichung 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.

$$e = b + g$$

$$d = b - g$$

also

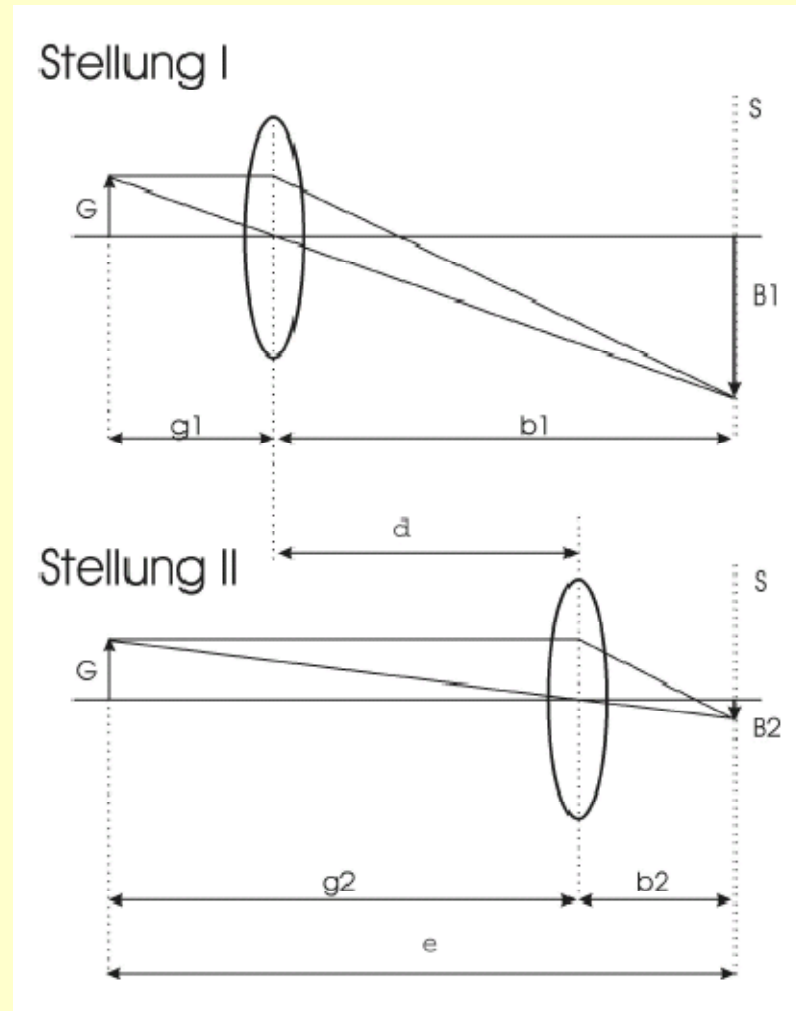
$$b = (e + d) / 2$$

$$g = (e - d) / 2$$

damit

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

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



Das Auge

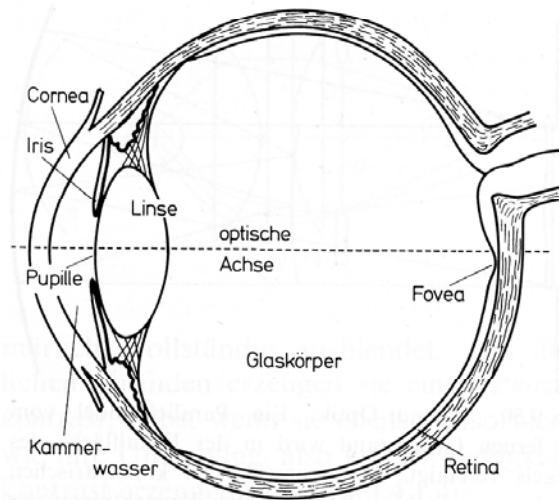
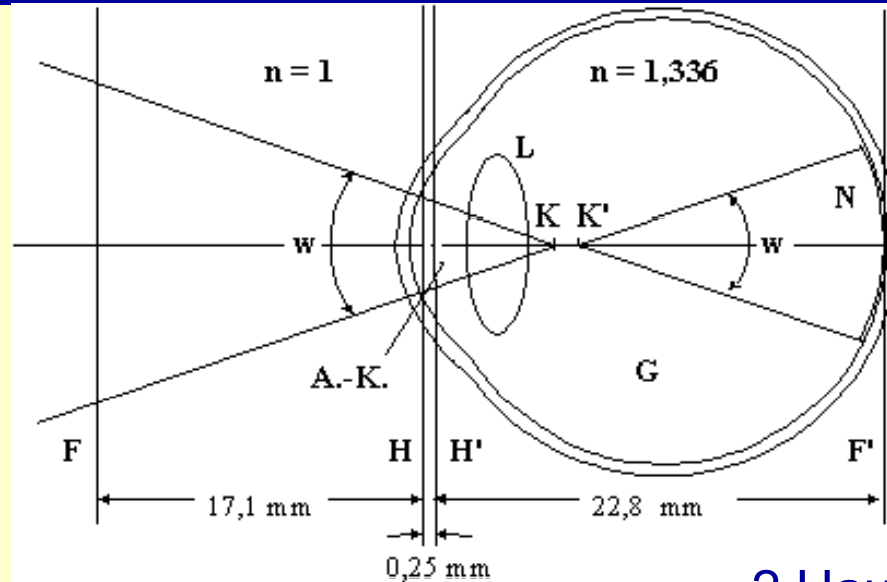
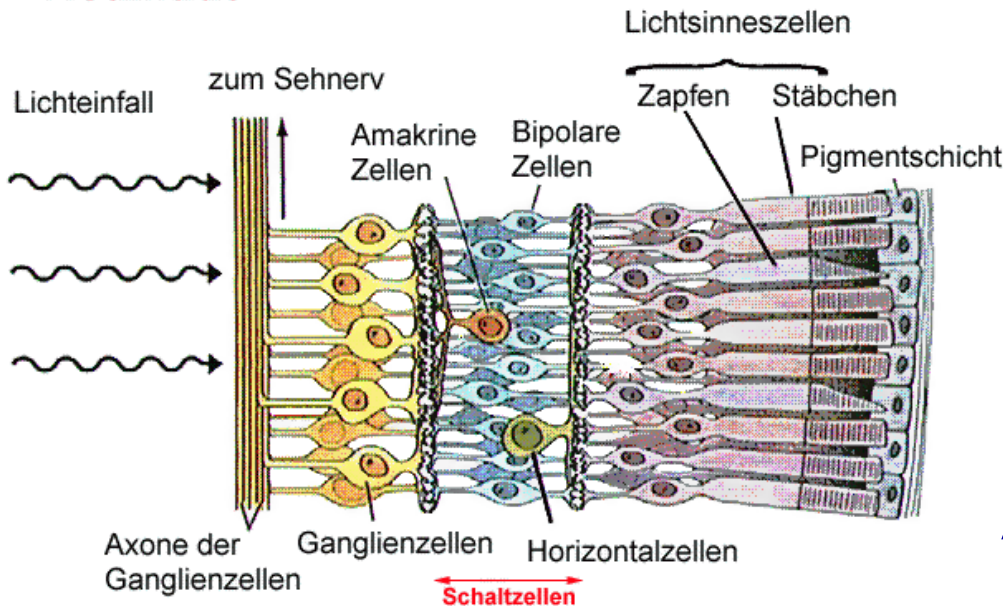


Abb. 9.51. Schnitt durch das menschliche Auge. (Nach H.-U. Harten)



Netzhaut

← Richtung der Informationsübertragung



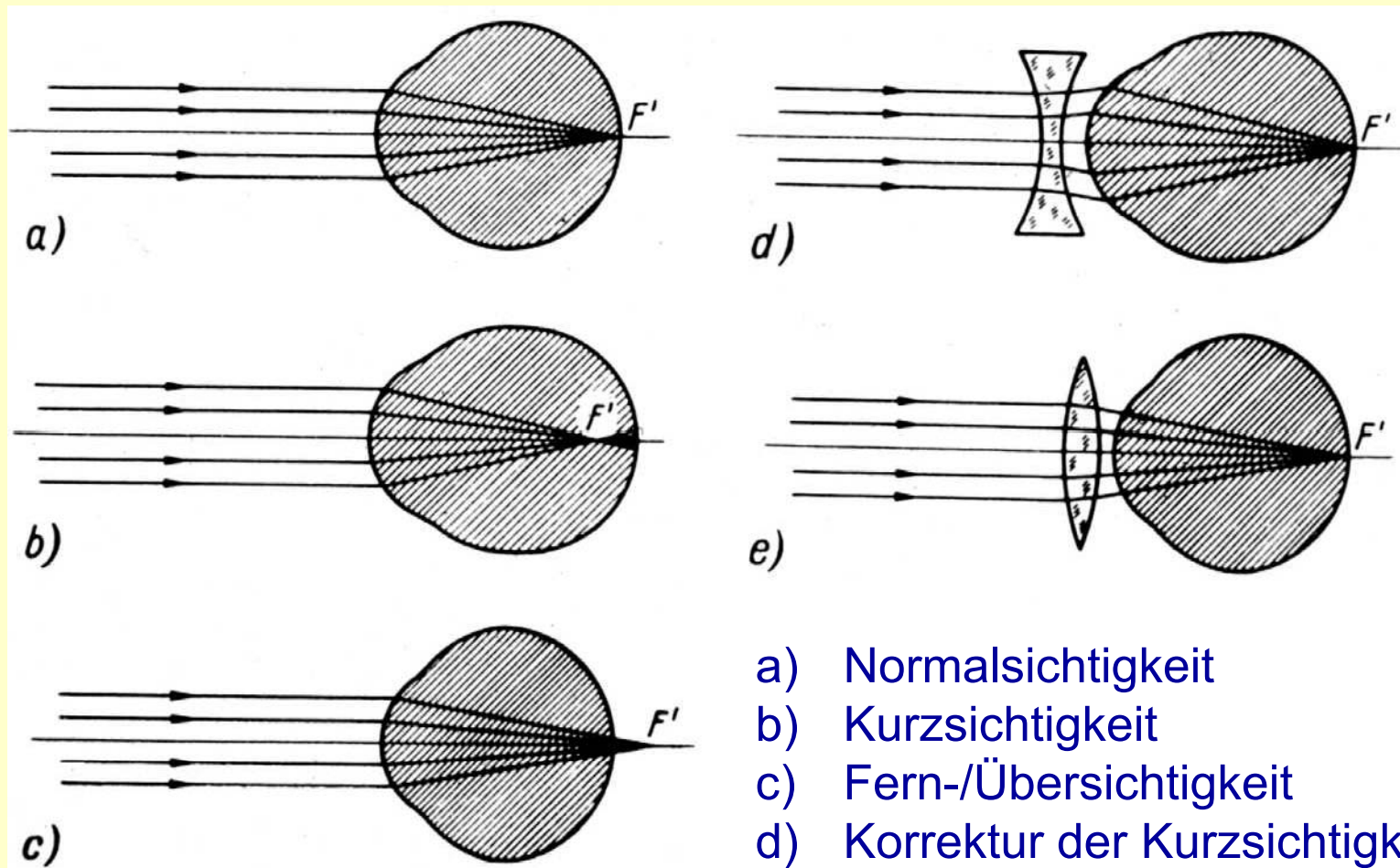
2 Hauptebenen
2 Knotenebenen
2 Brennebenen

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

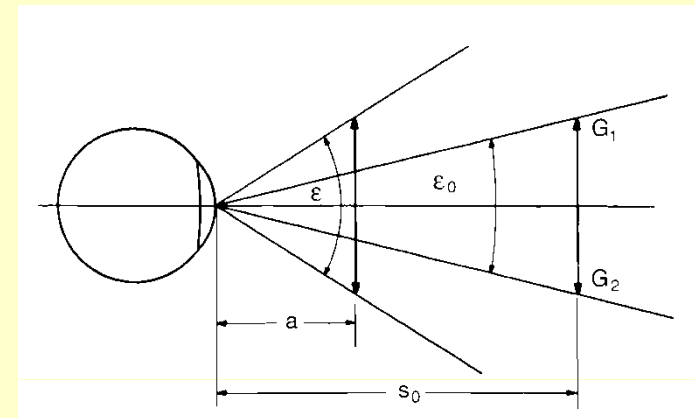
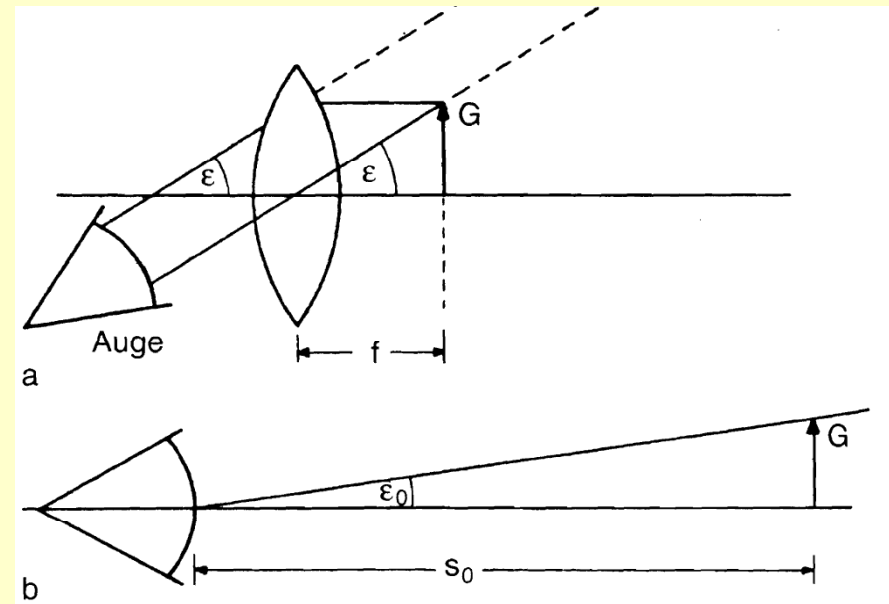
Gegenstandsweite = Brennweite (d.h. Bild im Unendlichen)

und Sehwinkel ohne Lupe in „deutlicher Sehweite“ s_0 definiert als

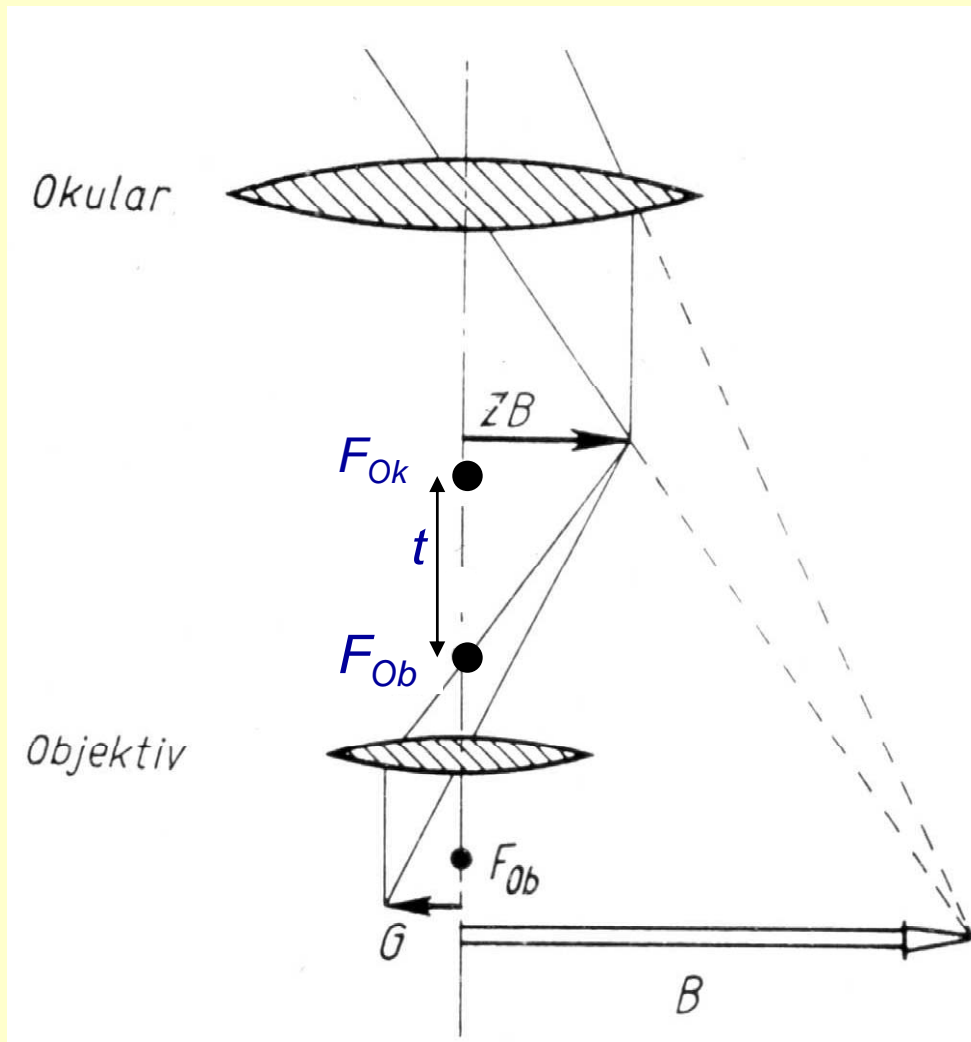
$$s_0 = 25 \text{ cm}$$

Damit gilt für die Lupenvergrößerung $V = s_0 / f$

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



Mikroskop Strahlengang



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

Vergrößerung:

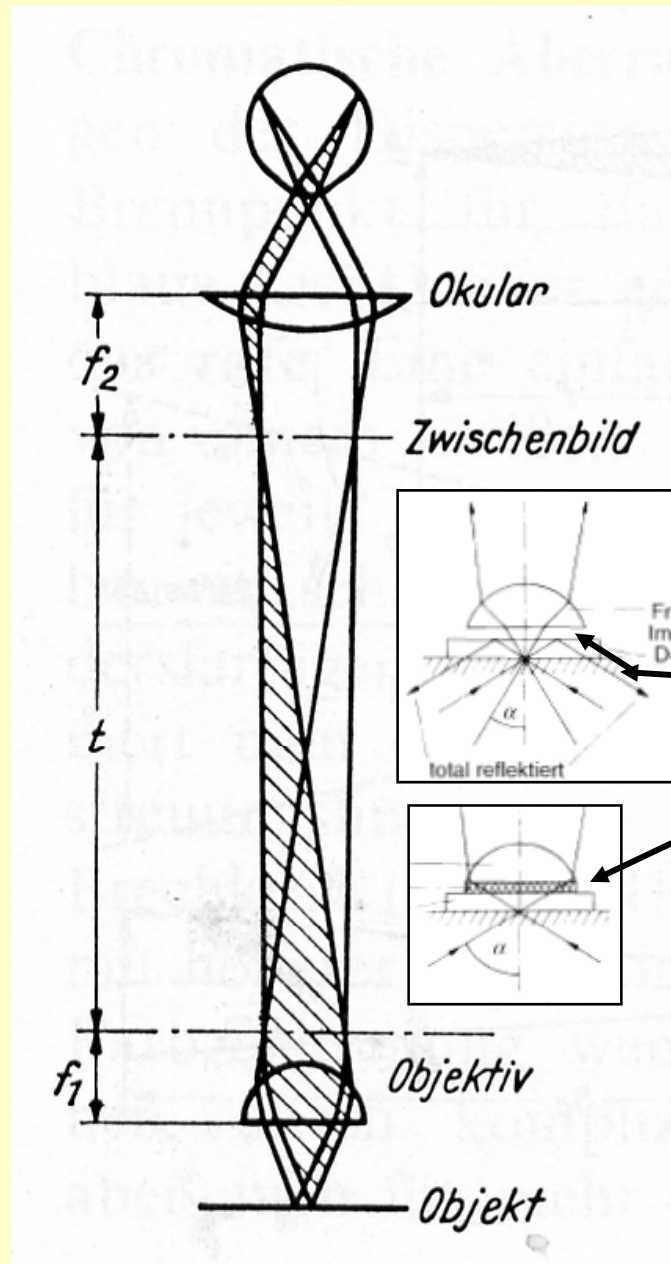
$$V_{ges} = V_{Ob} \cdot V_{Ok} \approx \frac{t}{f_1} \frac{s_0}{f_2}$$

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



Begrenzung durch Beugungseffekte

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

trennbarer Minimalabstand
 Δs für selbstleuchtende
 Objekte (Helmholtz)

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

bzw. nicht-selbstleuchtende
 Objekte (Abbé)

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
 Noch höher mit Elektronenstrahlen mit
de Broglie-Wellenlänge

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

Fernrohre

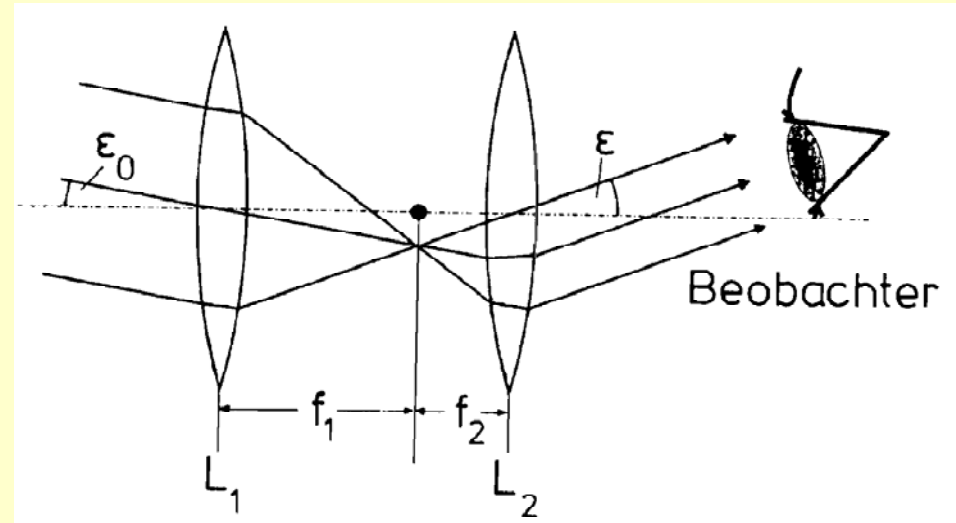
Gegenstand weit weg (Idealisierung: im „Unendlichen“)

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

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



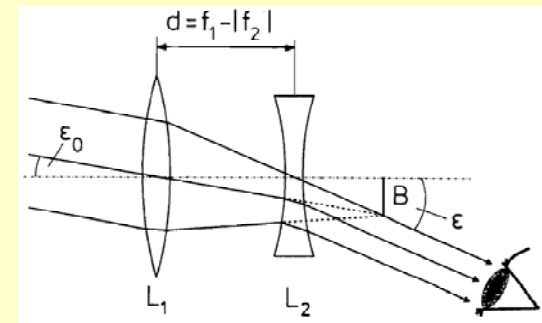
Wichtig (oft wichtiger als Vergrößerung):

„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 Sammell- und Zerstreuungslinse. Formeln analog.

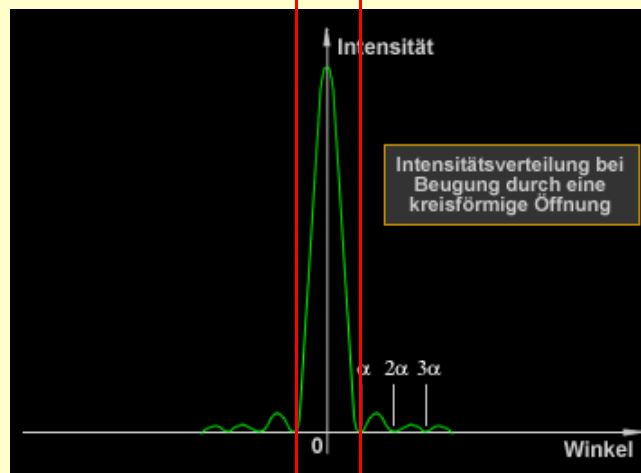
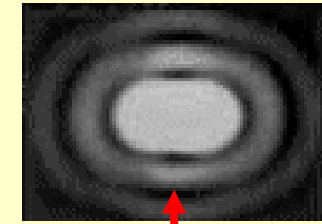
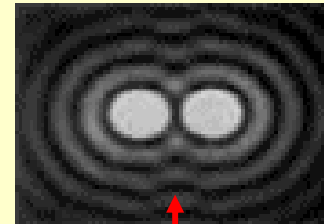
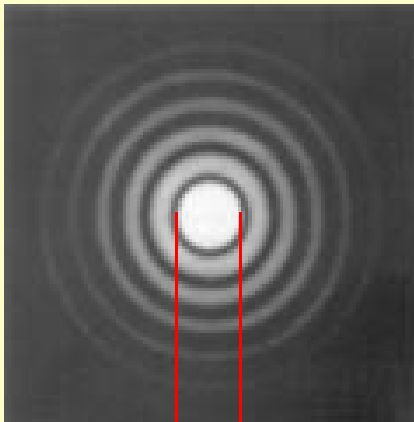
Experimente zur Wellenoptik

- 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

Beugung

Beugungsbild



$\alpha > \alpha_C$: 2 getrennte Objekte

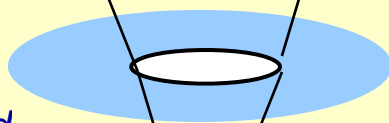
$\alpha < \alpha_C$: 2 nichtgetrennte Objekte

$$\alpha_C = 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

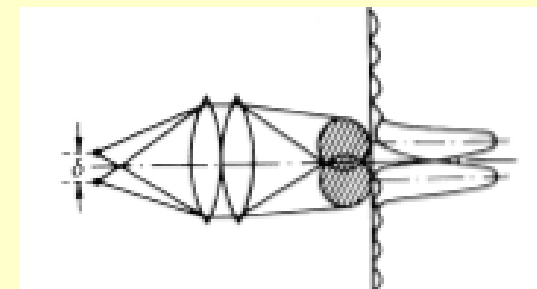
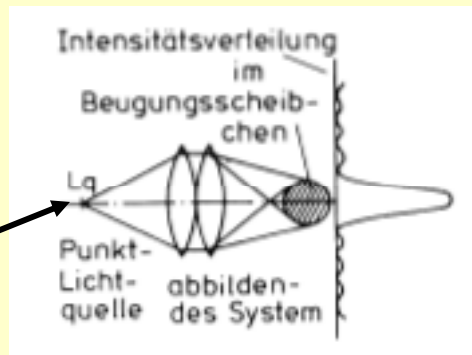
Rayleigh-Kriterium:

Zwei Punkte können dann noch räumlich aufgelöst werden, wenn das zentrale Maximum der einen Beugungsscheibe in das erste Minimum der zweiten fällt.

Loch-
blende:
Durch-
messer d

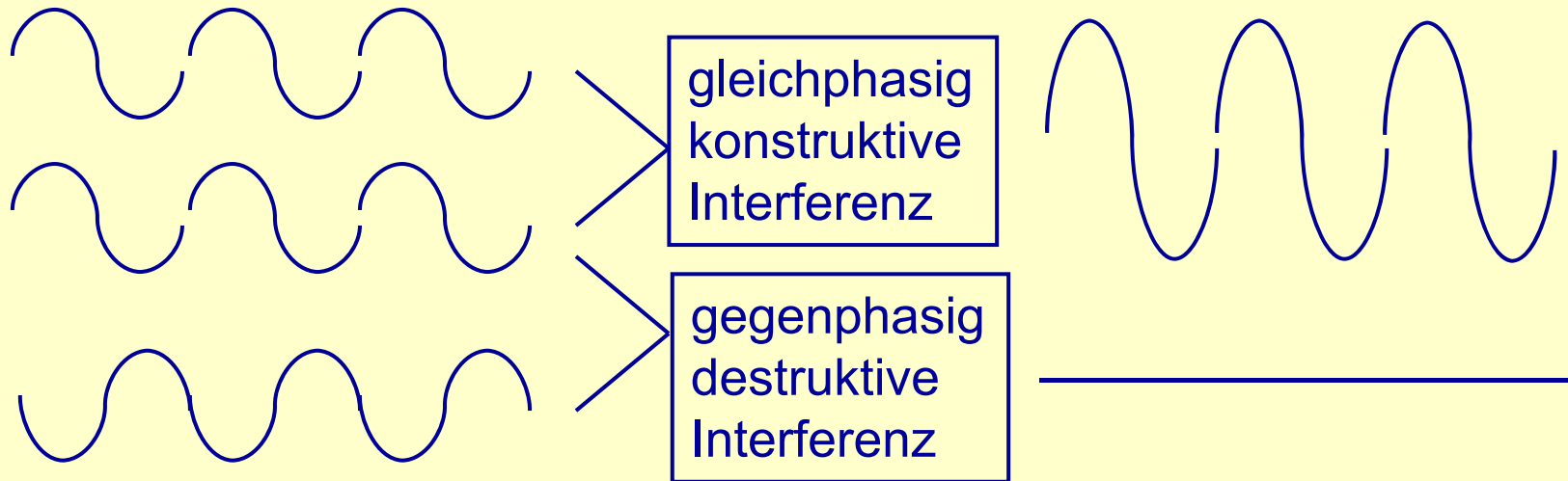


Punktlicht-
quelle



Wellenoptik

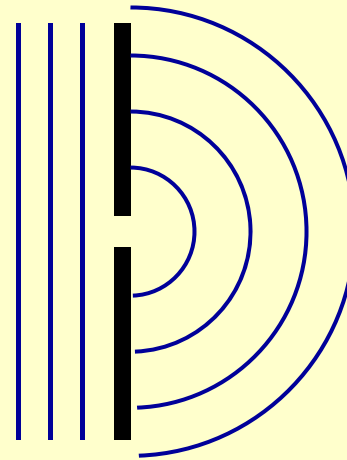
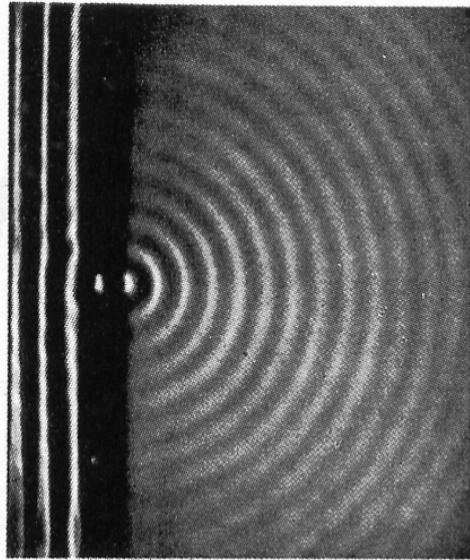
kohärente (phasenstarre) Überlagerung



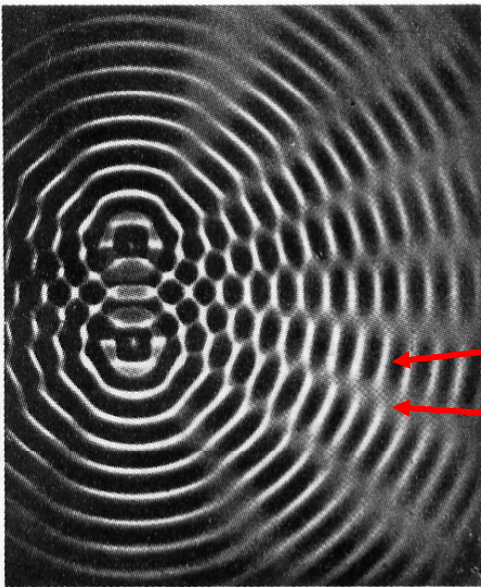
Huygenssches Prinzip:

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.

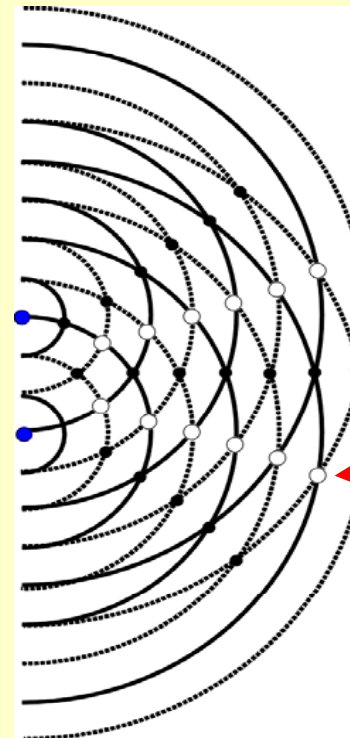
Beugung



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:

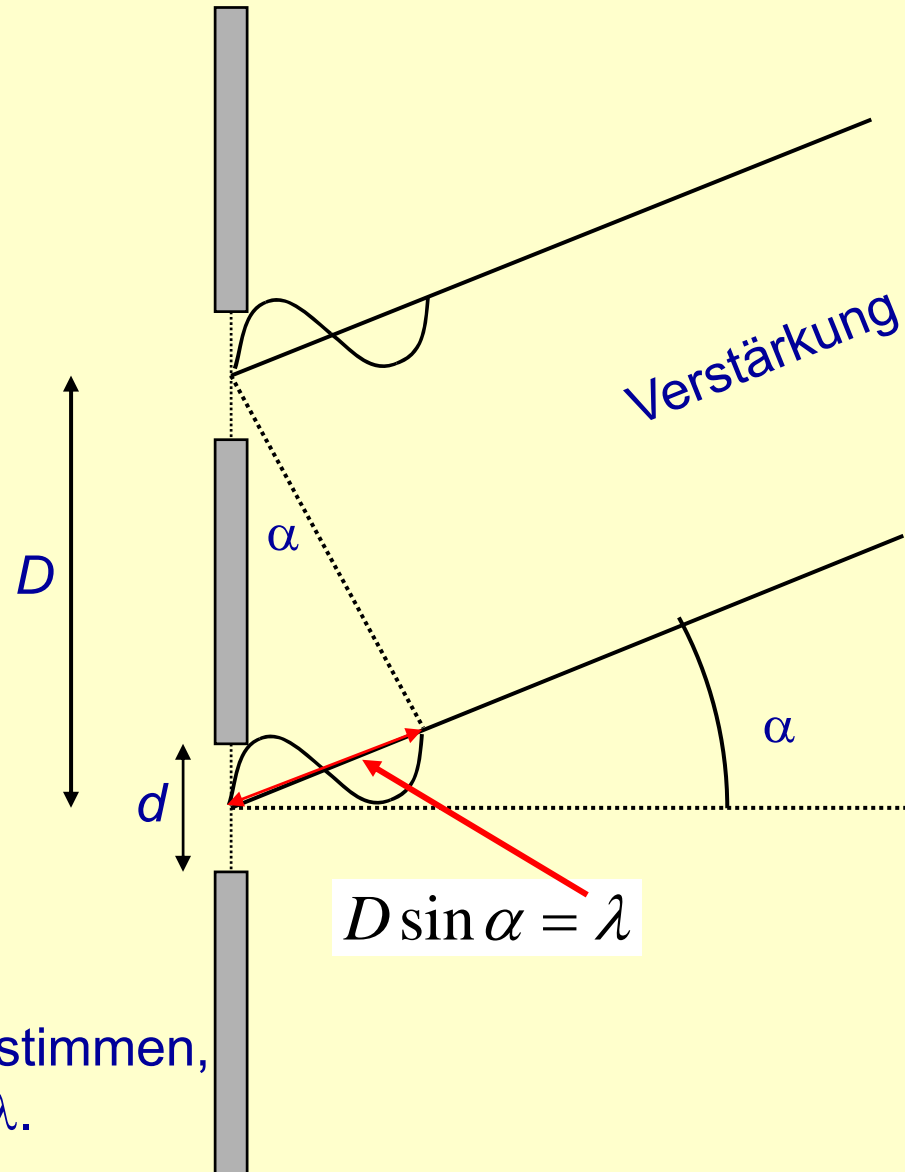
$$D \sin \alpha = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

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:

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

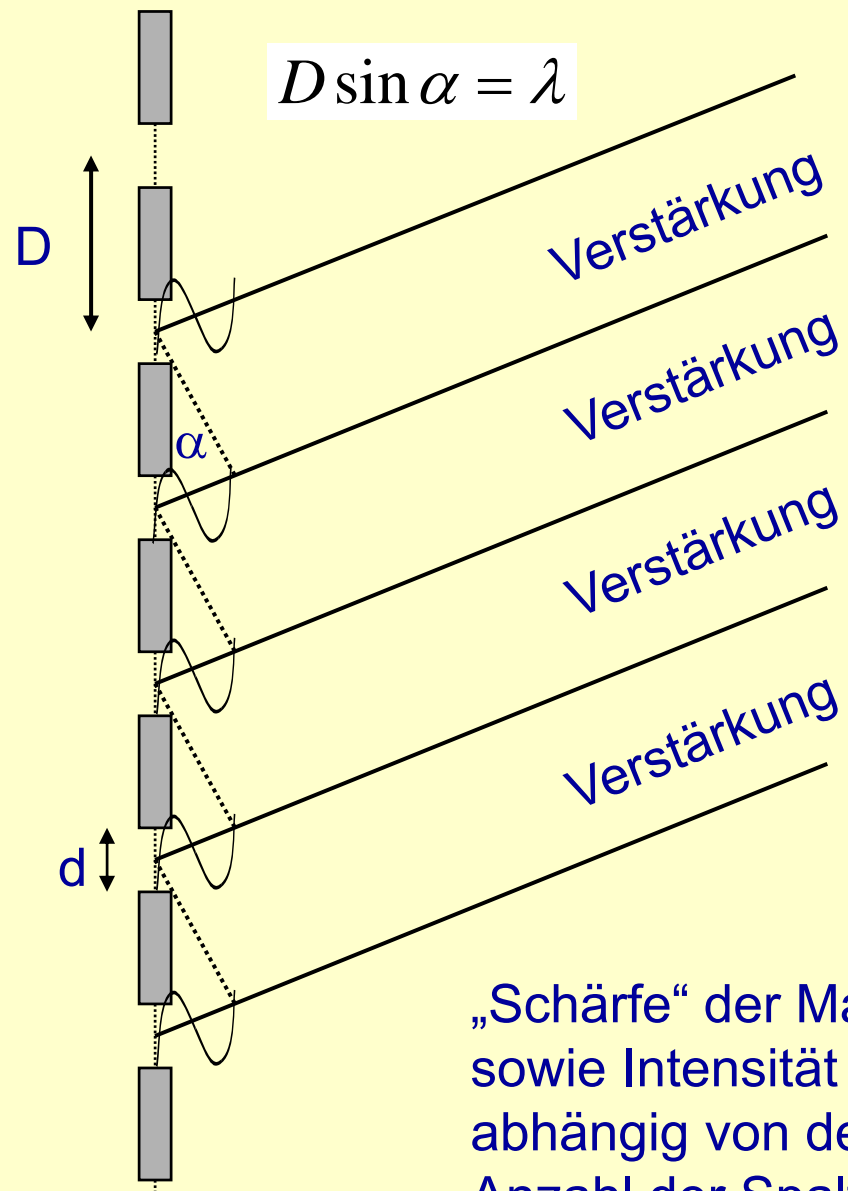
Beugungsminima:

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

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

d : Spaltbreite
(hier wieder vernachlässigt!
siehe aber Einzelspalt)

D : Spaltabstand



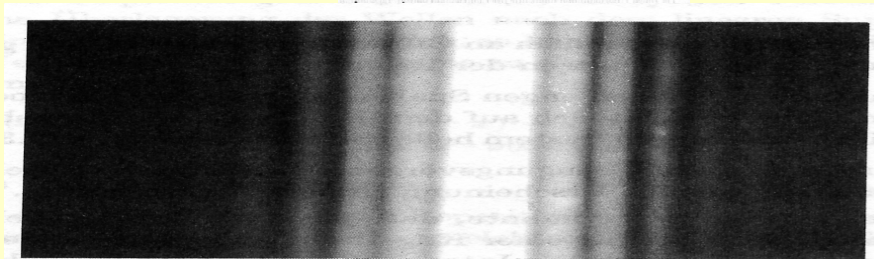
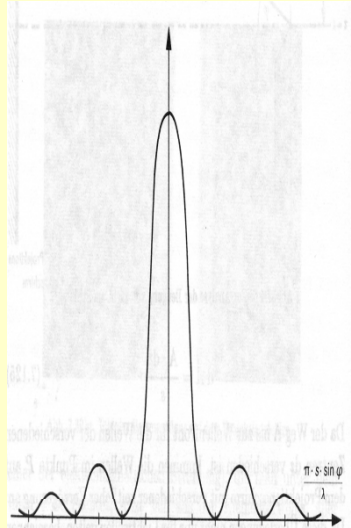
„Schärfe“ der Maxima,
sowie Intensität
abhängig von der
Anzahl der Spalte

Beugung am Einzelspalt

$$d \approx \lambda$$

Beugungsbild und Intensitätsverteilung

Mathematisch:
Fourier-Analyse
der Öffnung bzw.
Blende



Beugungsmaxima:

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

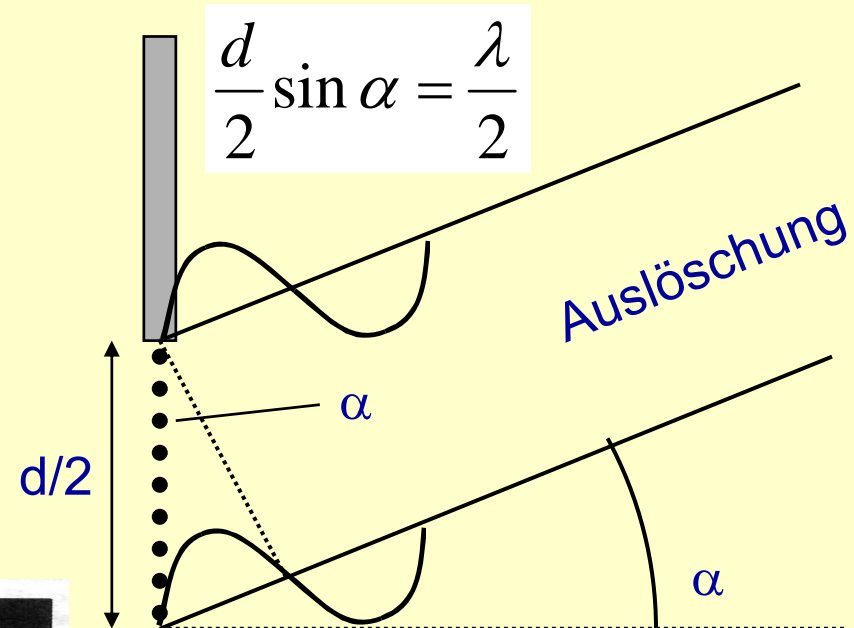
Beugungsminima:

$$d \sin \alpha = n \lambda$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

aber Maximum bei $n=0$

Beachte: Formeln genau umgekehrt wie
bei Doppelspalt und Gitter!



$$\frac{d}{2} \sin \alpha = \frac{\lambda}{2}$$

Auslöschung

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 $\alpha = 0$!

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.

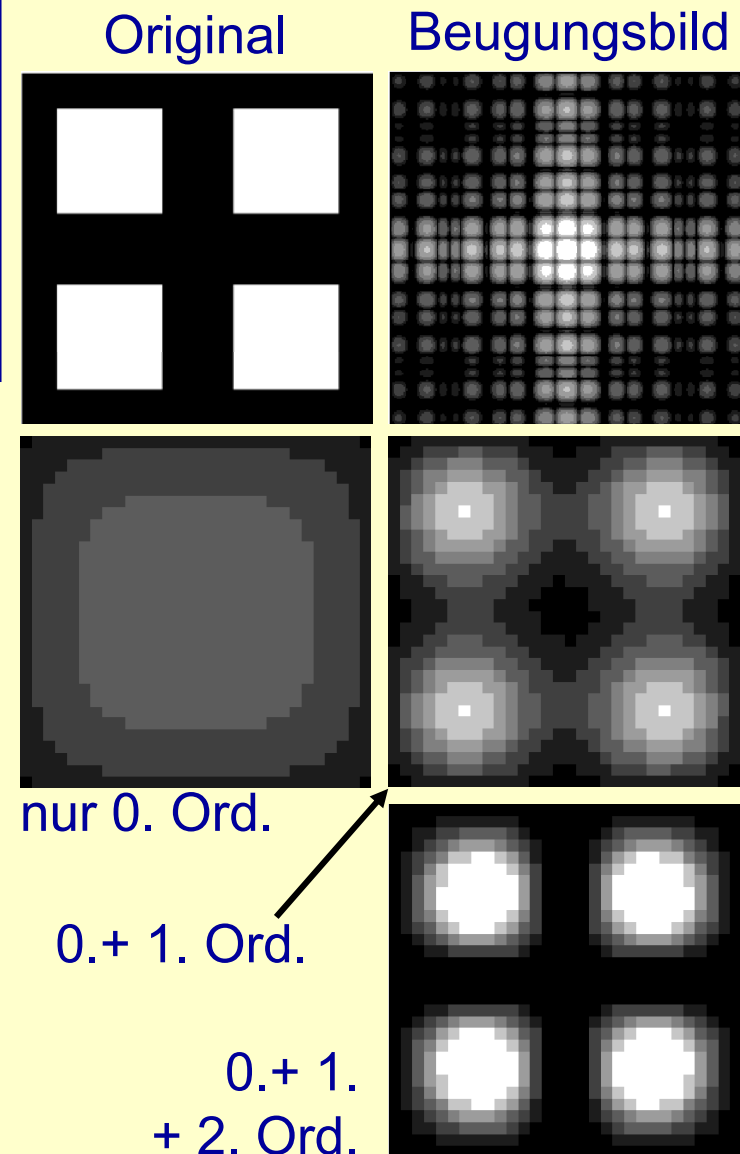
Auflösung bei:

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

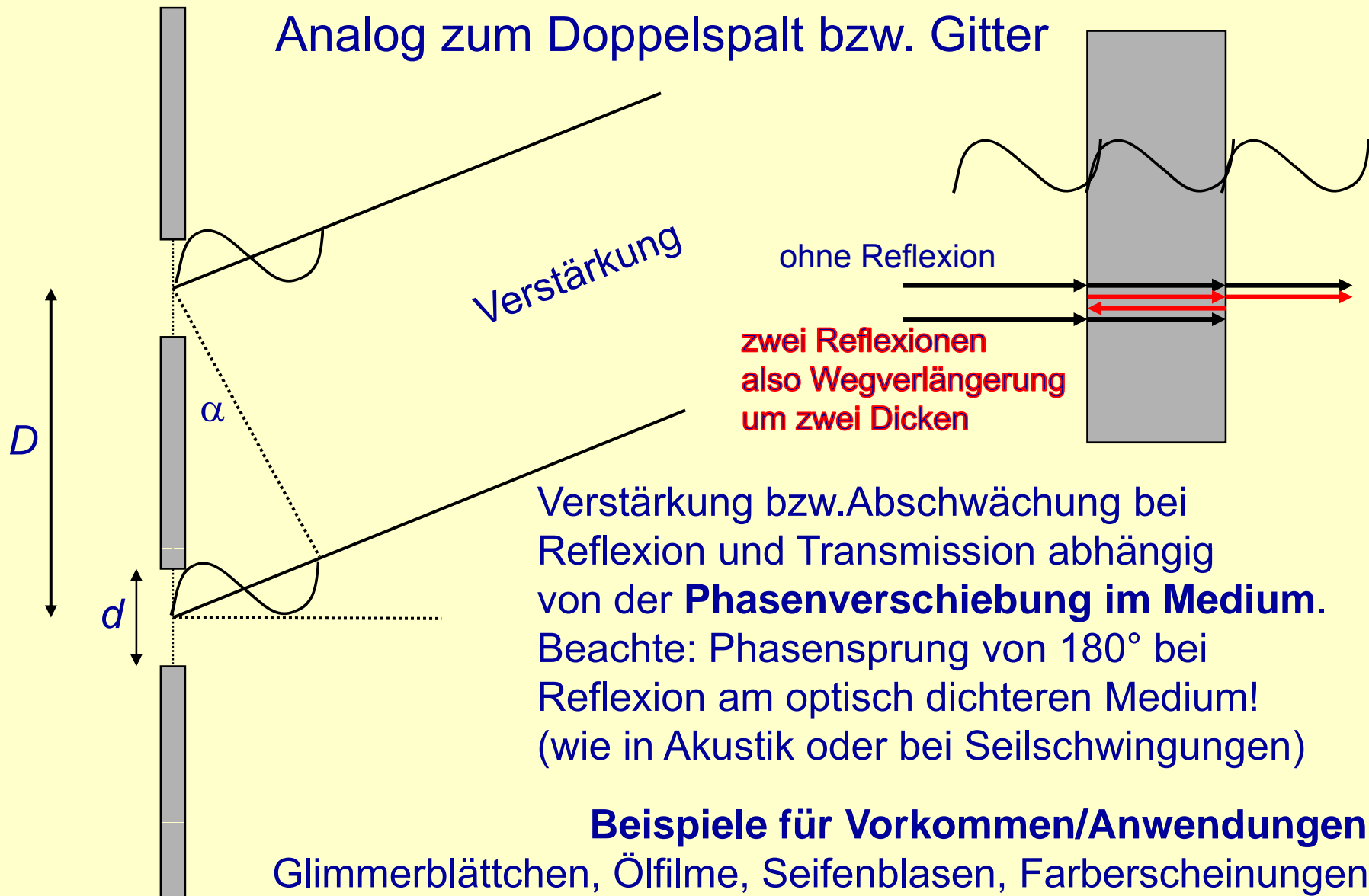
Immersionsmikroskopie $\Delta s = 200 \text{ nm}$

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

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



Interferenzen an dünnen Schichten



Verstärkung bzw. Abschwächung bei Reflexion und Transmission abhängig von der **Phasenverschiebung im Medium**.
Beachte: Phasensprung von 180° bei Reflexion am optisch dichteren Medium!
(wie in Akustik oder bei Seilschwingungen)

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

Polarisation

Licht ist **Transversalwelle**

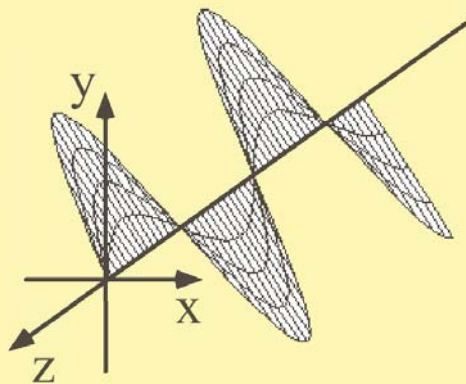
Schwingungsrichtung von E-Feldvektor und H-Feldvektor sind **senkrecht** zur Ausbreitungsrichtung

Polarisationsrichtung: Schwingungsrichtung des E-Feldvektors.

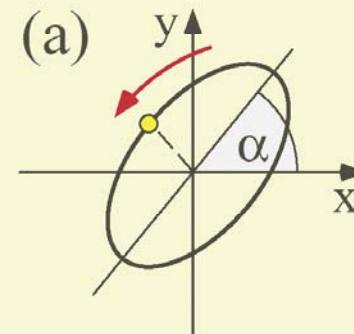
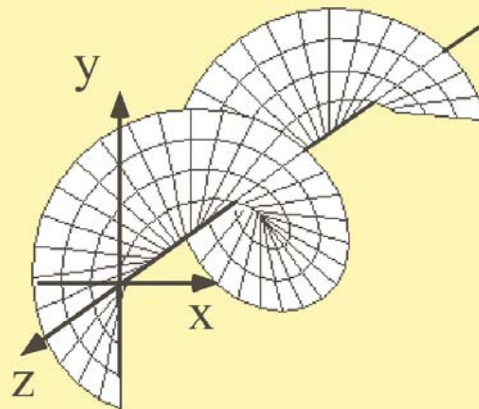
Polarisation

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

Linear polarisierte Welle



Zirkular polarisierte Welle



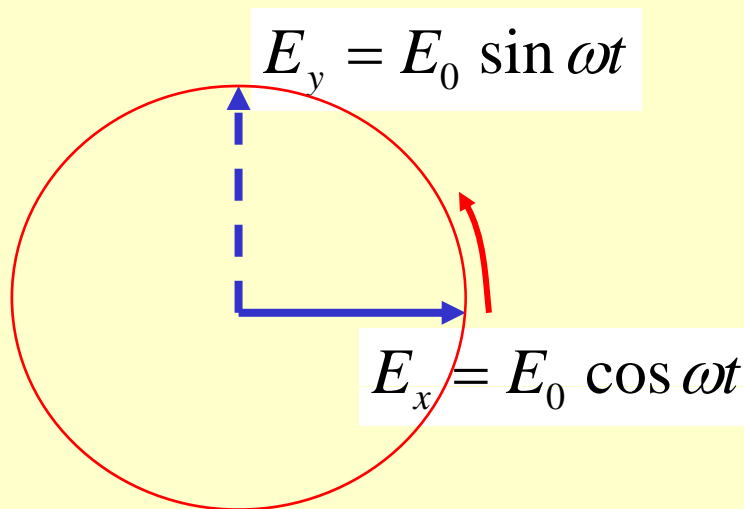
Elliptisch polarisiertes Licht

Zirkulare Polarisation

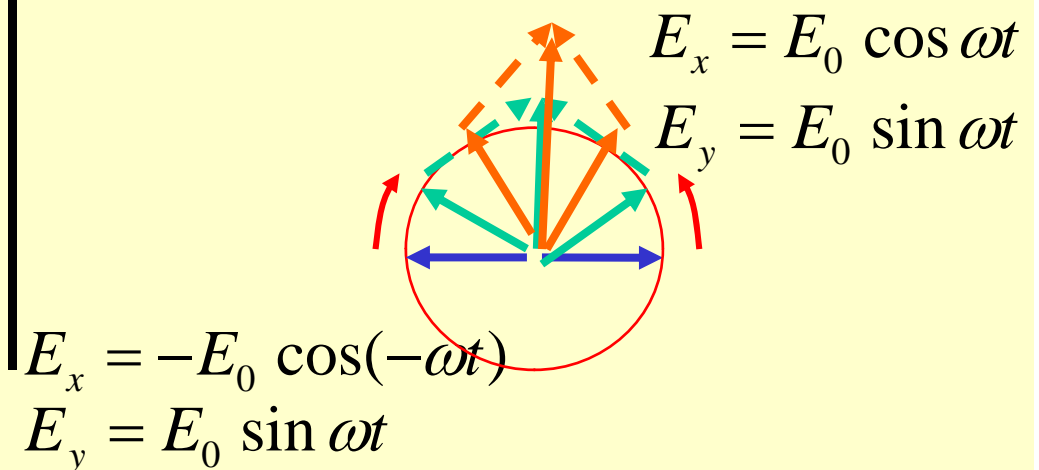
Zirkular und linear polarisierte Lichtstrahlen

sind **nichts völlig verschiedenes!**

Zirkulares Licht kann aus linear polarisiertem Licht zusammengesetzt gedacht werden:



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



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

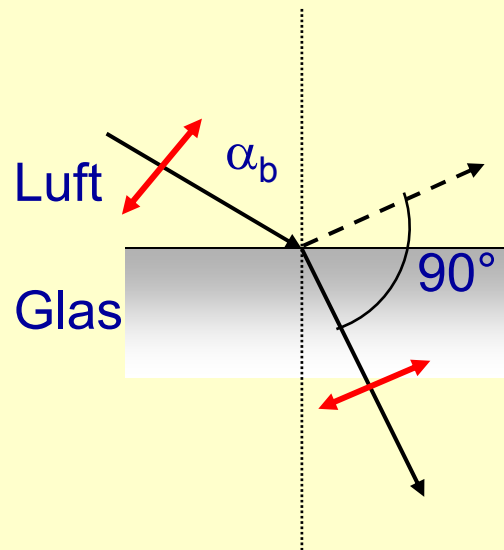
=> Mit doppelbrechenden Materialien kann die Polaritätsart verändert werden.

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

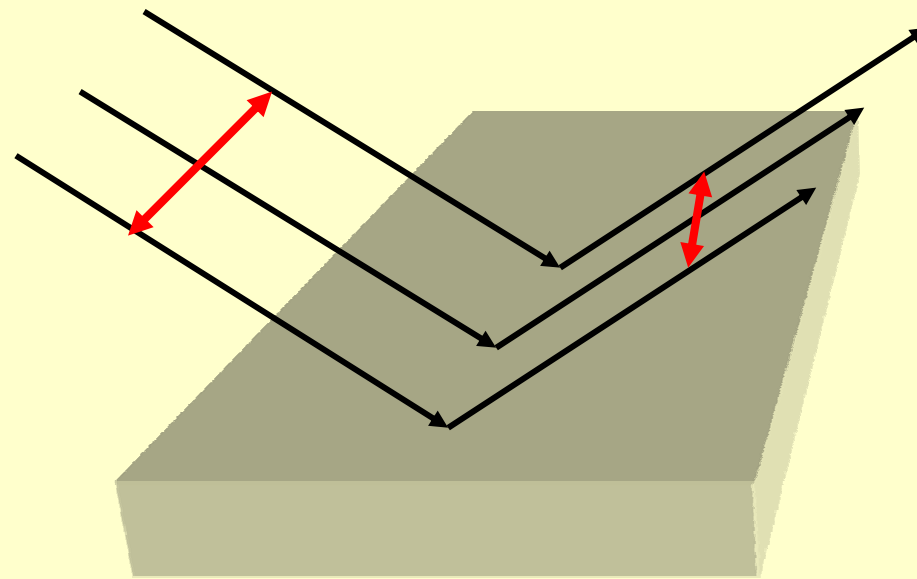
Polarisation durch Reflexion

Brewster-Winkel α_b : $\tan \alpha_b = n$

→ Reflektiertes Licht ist vollständig polarisiert!

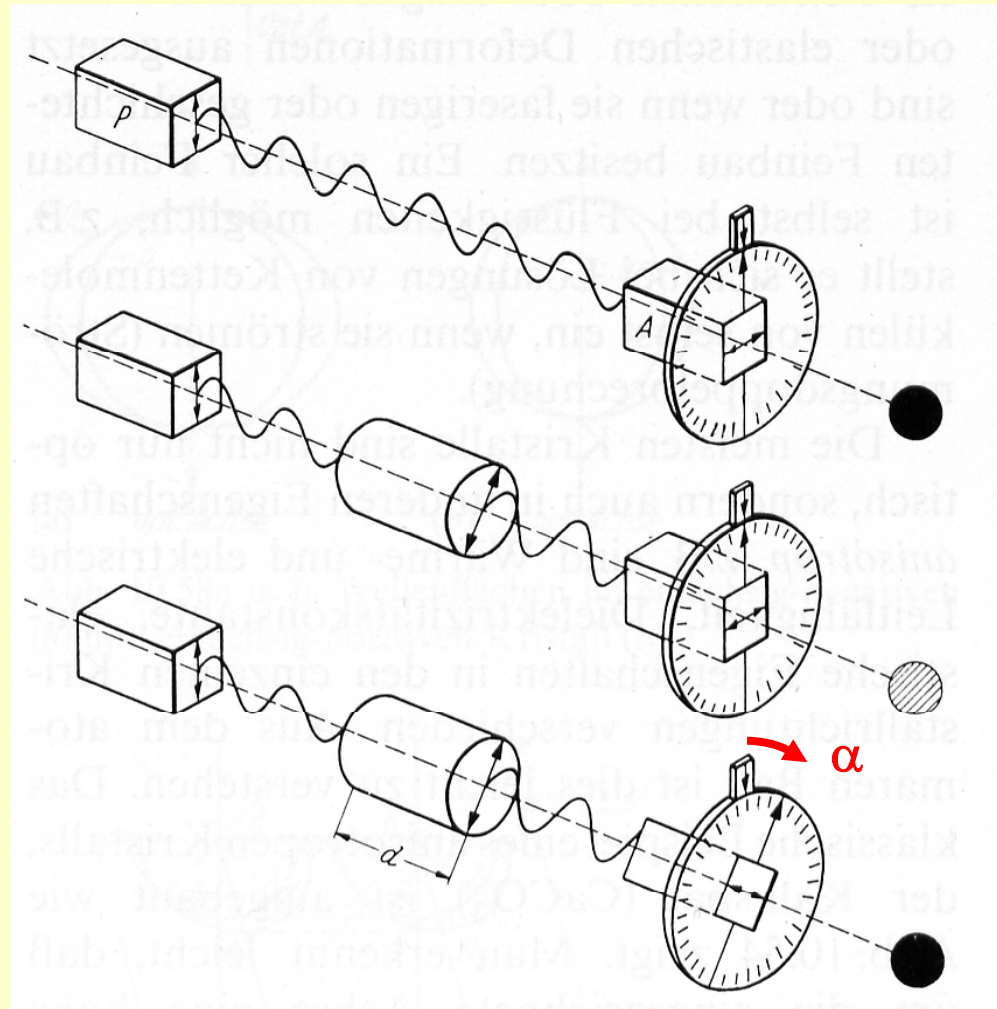


E -Feldvektor parallel zur Einfallsebene und $\alpha = \alpha_b$: Licht wird transmittiert, aber kein Licht wird reflektiert!



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

Polarimetrie



Drehung der Polarisations Ebene 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

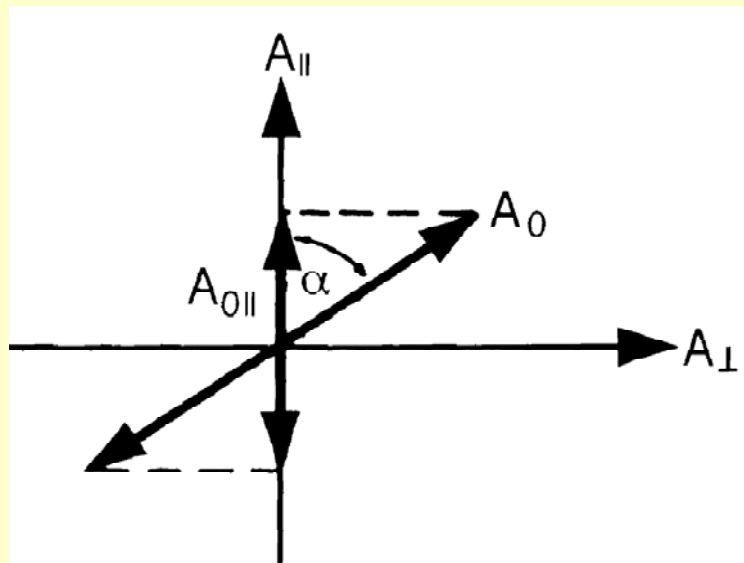
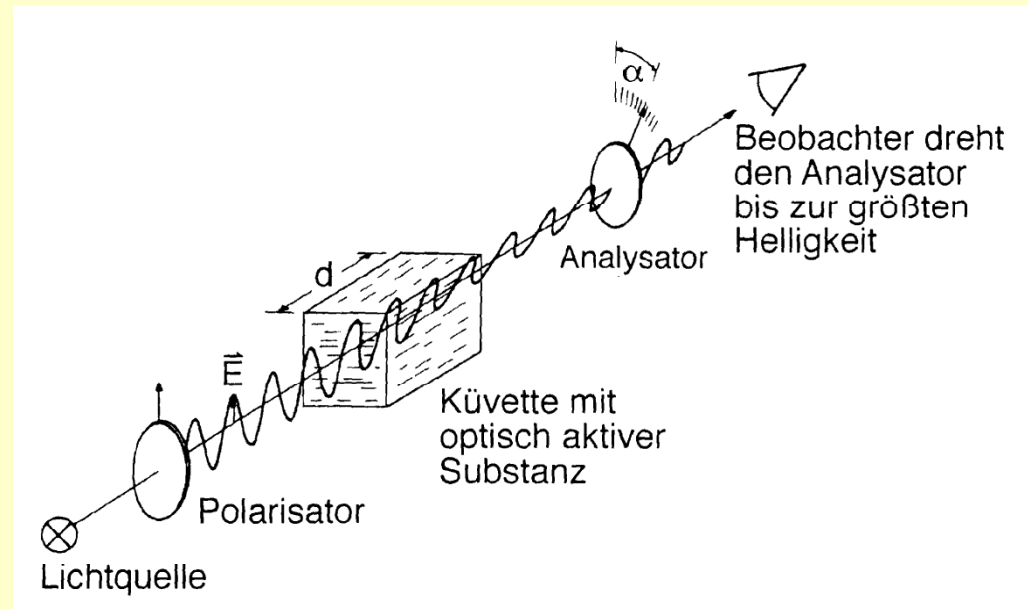
$$A_d = A_0 \cos \alpha$$

⇒ für Intensitäten

$$I \sim A^2$$

⇒ Gesetz von Malus

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



Lattenzaun-Analogon (Welle auf Seil)

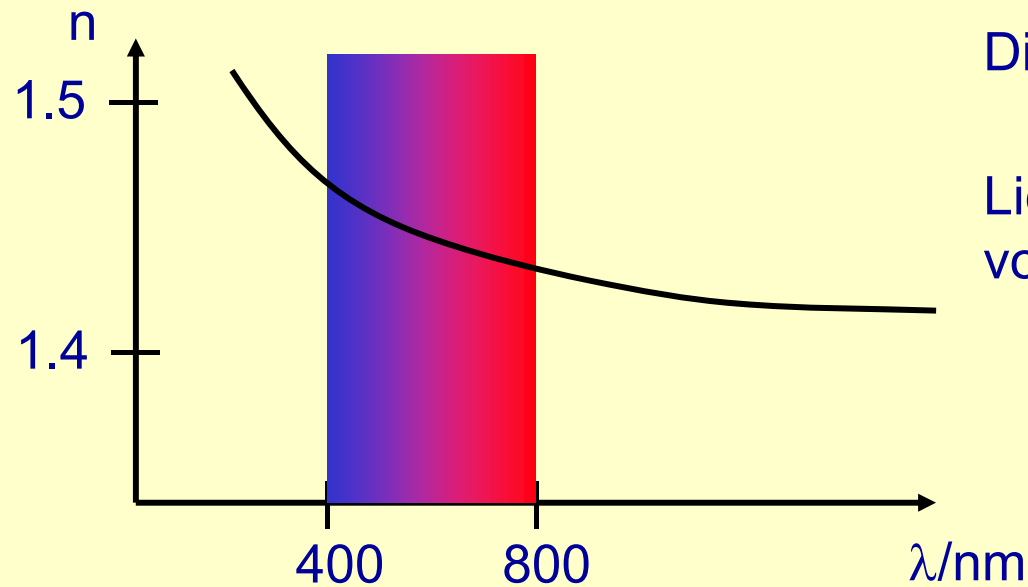
Beachte aber

Mikrowellenversuch mit Drahtgitter:

Bei elektr. Feld in Stabrichtung

Absorption und Reflexion!

Dispersion

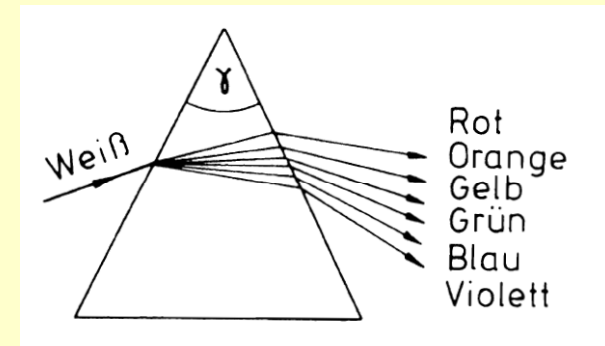


Dispersion: $\frac{dc}{df} \neq 0$

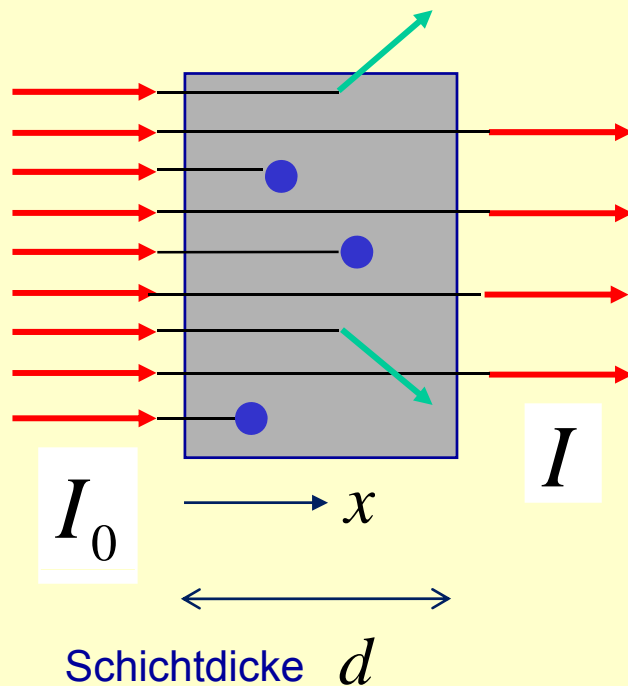
Lichtgeschwindigkeit abhängig von Frequenz (oder Wellenlänge)

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

$$dI = -\mu I dx$$

$$\int \frac{dI}{I} = -\mu \int dx$$

Beer-Lambertsches Extinktionsgesetz:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad \mu = \mu(\lambda, C)$$

Extinktion setzt sich zusammen aus

a) **Absorption** des Lichts durch die Moleküle/Atome des Mediums

(Dichroismus: Richtungs- und Polarisationsabhängigkeit der Absorption)

b) **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

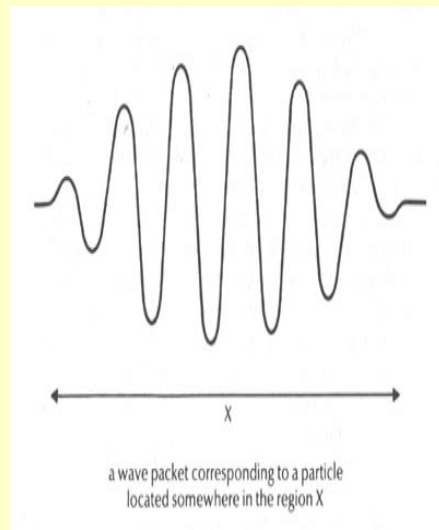
(z.B. Staub in Luft, gestreutes Licht ist im Allg. polarisiert)

Laser / Welle-Teilchen-Dualismus

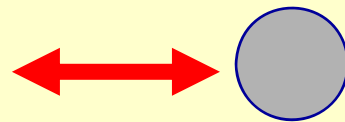
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



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



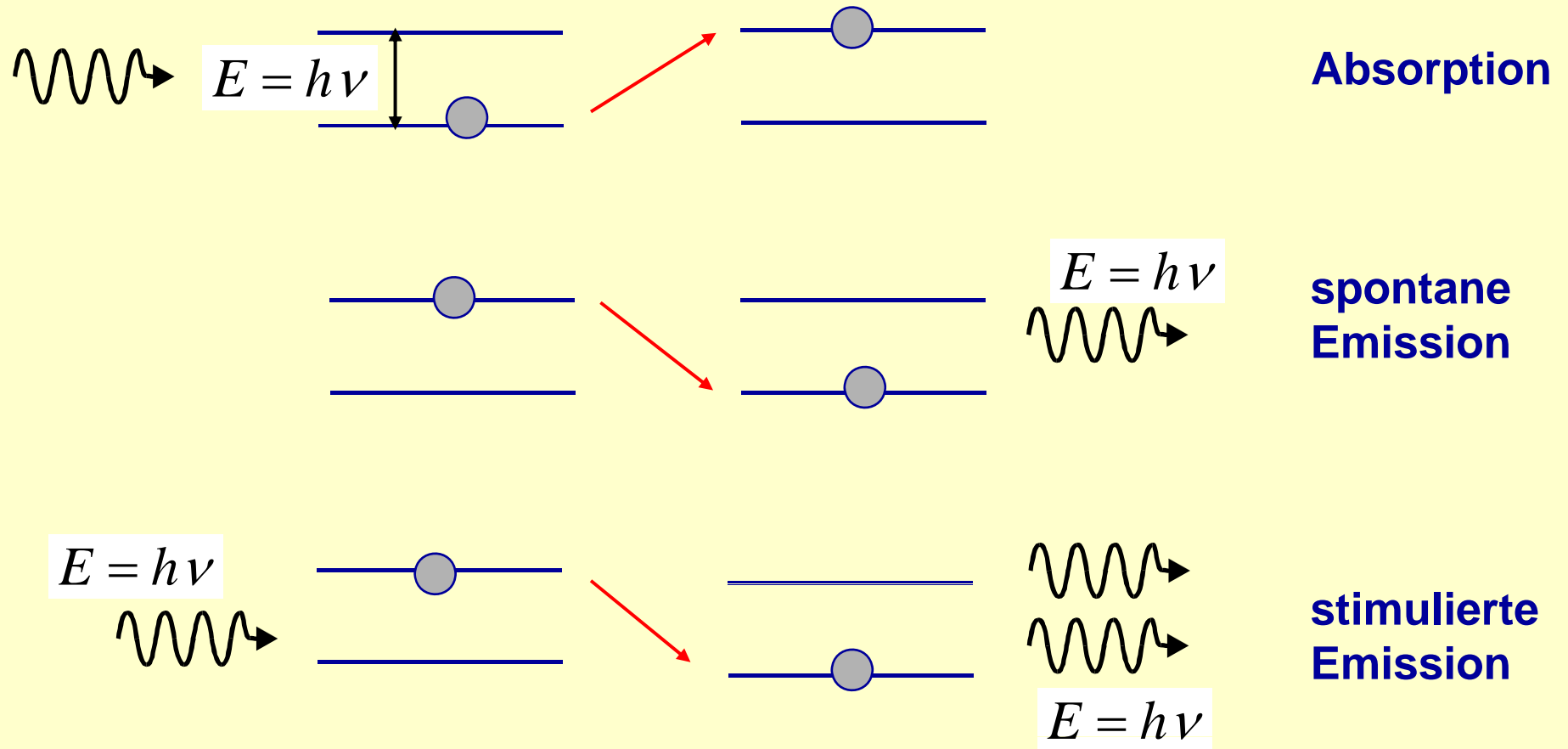
$$E = h\nu$$



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

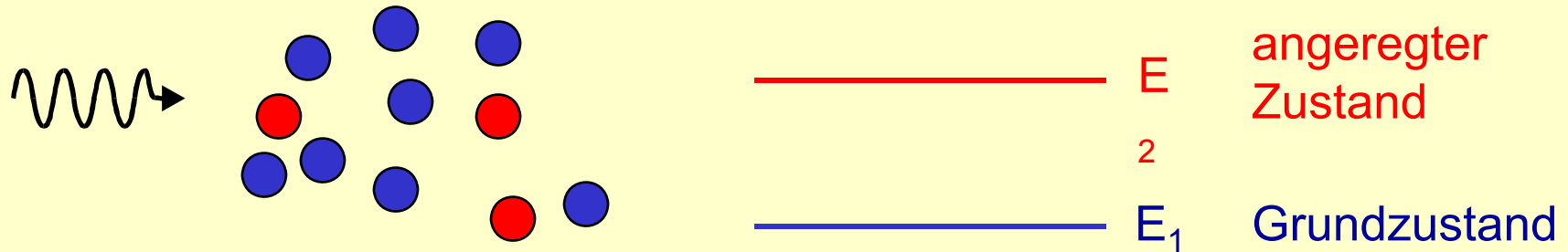
Energiequantum $E=h \cdot f$
Plancksches Wirkungsquantum h
 $h = 6.6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Laser / Elementarprozesse

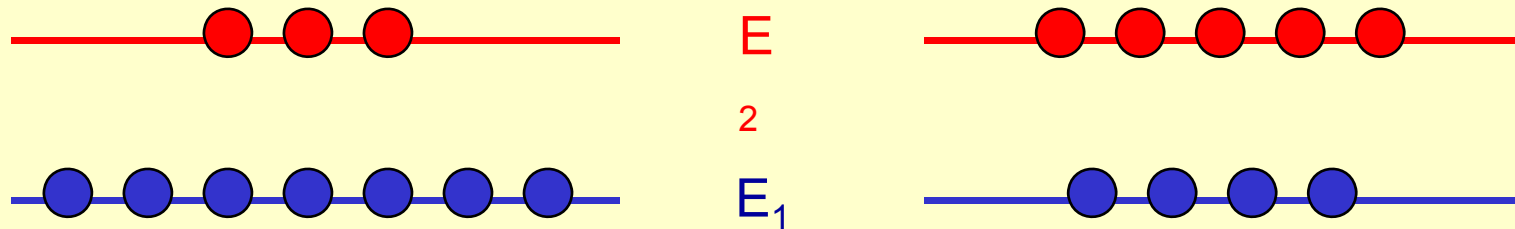


Laserlicht hat - **feste Frequenz** (Wellenlänge): monochromatisch
- **feste Phasenbeziehung**: konstruktive Überlagerung

Laser / Besetzungsinversion



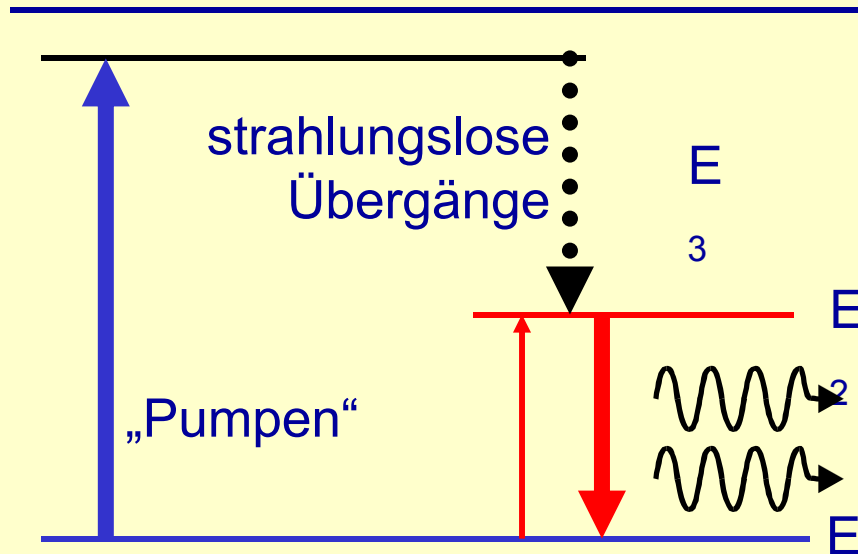
Im thermodynamischen Gleichgewicht: Anzahl N_1 der Atome im Grundzustand E_1 höher derer (N_2) im angeregten Zustand E_2 , d.h. $N_1 > N_2$ und daher: Absorption aus Grundzustand überwiegt stimulierte Emission aus angeregtem Zustand



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

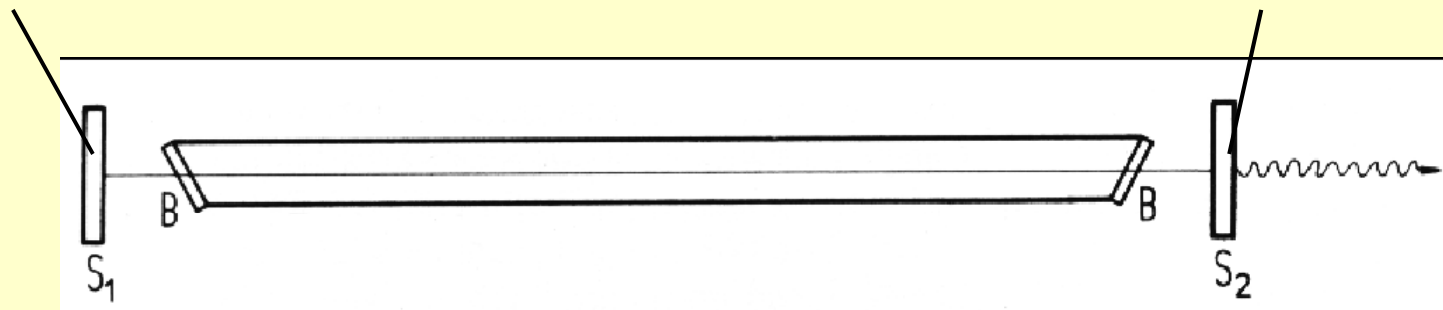
Besetzungsinversion:

- 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:

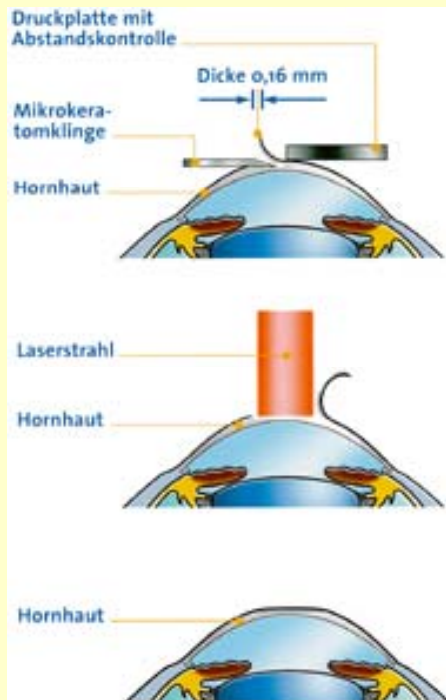
- extrem intensiv
- monochromatisch
- kohärent
- gebündelt

Thermochemische Prozesse: Laserchirurgie
(Koagulieren, Schneiden, Verdampfen)

Photochemische Reaktionen: Photochemotherapie (Nekrotisieren)

Mechanische Effekte (optischer Durchschlag):

Laserchirurgie, Mikrochirurgie



LASIK



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 ($< 0,25s$) 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