

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 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 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 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 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

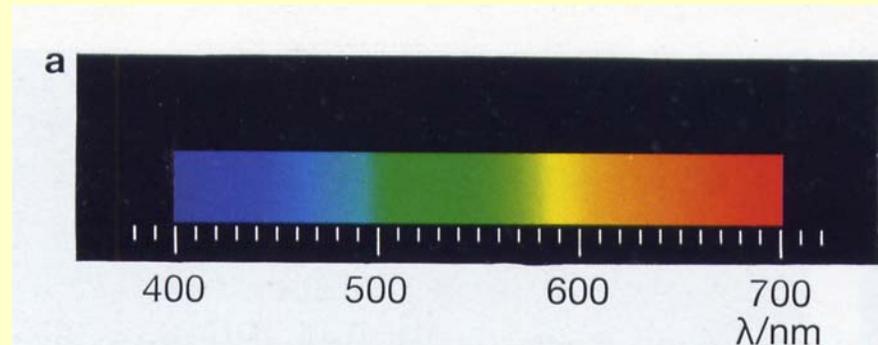
Licht ist elektromagnetische Welle.

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!



$$c = f \cdot \lambda$$

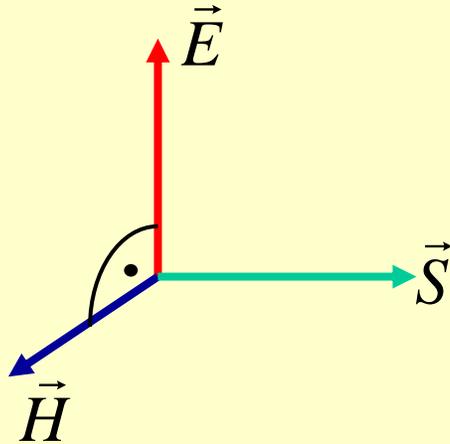
$$= 2.997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

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

Lichtstrahlen breiten sich geradlinig aus!

Wirklich?

Energetische Größen

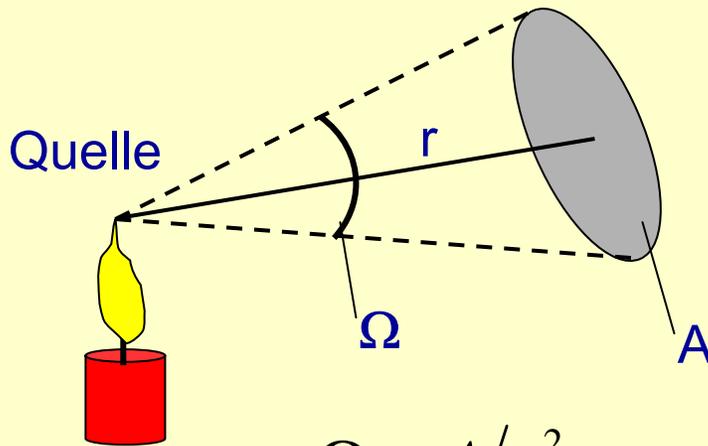


$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Energiestromdichte
(Poynting-Vektor)

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

ε : Energiedichte
in J/m³



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

Raumwinkel

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

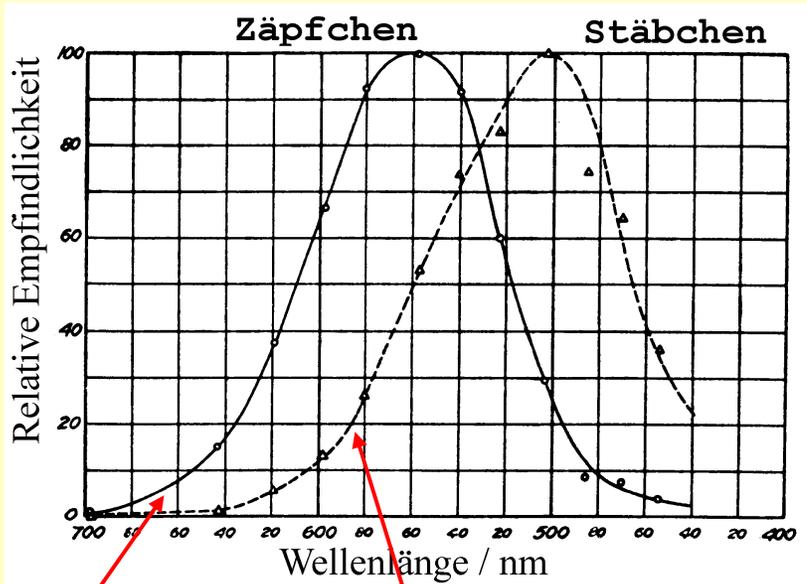
Strahlstärke $I = d\Phi/d\Omega$: Strahlungsfluß pro Raumwinkel (Watt/Steradian)

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
Maximum bei
555 nm (grün)

Dunkeladaption
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

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

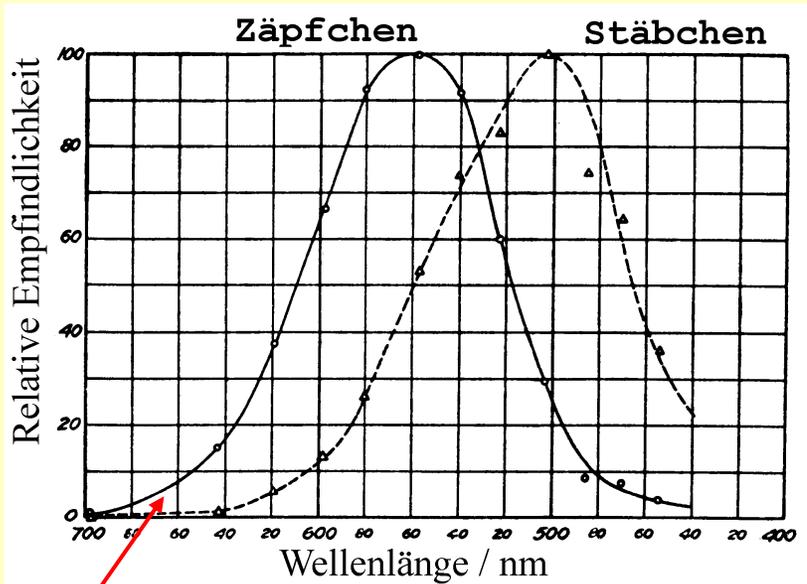
(Lux) lx = cd · sr/m²

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

sb = cd/m²

Photometrische Größen 2

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



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:

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

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 Raumwinkel-einheit 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

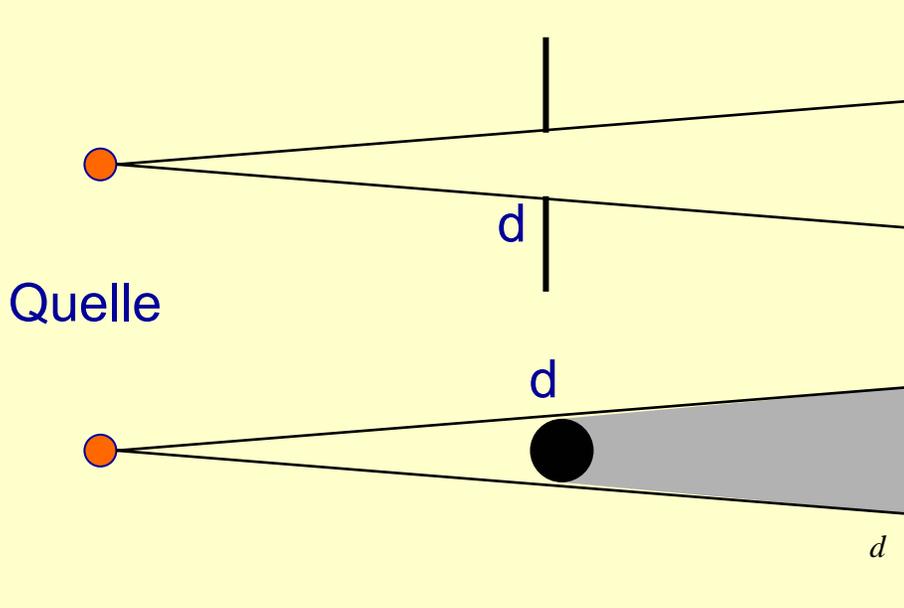
gesamte Leuchtdichte:

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

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.
Licht durchläuft den Weg der kleinsten optischen Weglängen.

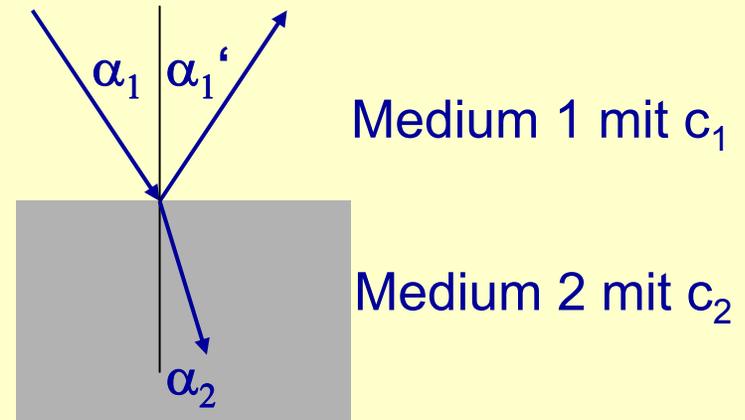
$$t = \sum_i \frac{s_i}{c_i} = \frac{1}{c_0} \sum_i n_i s_i$$

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

Brechung und Reflexion

Lichtgeschwindigkeit $c_1 \neq c_2$

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad \text{Brechung}$$



Snelliussches Brechungsgesetz:

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

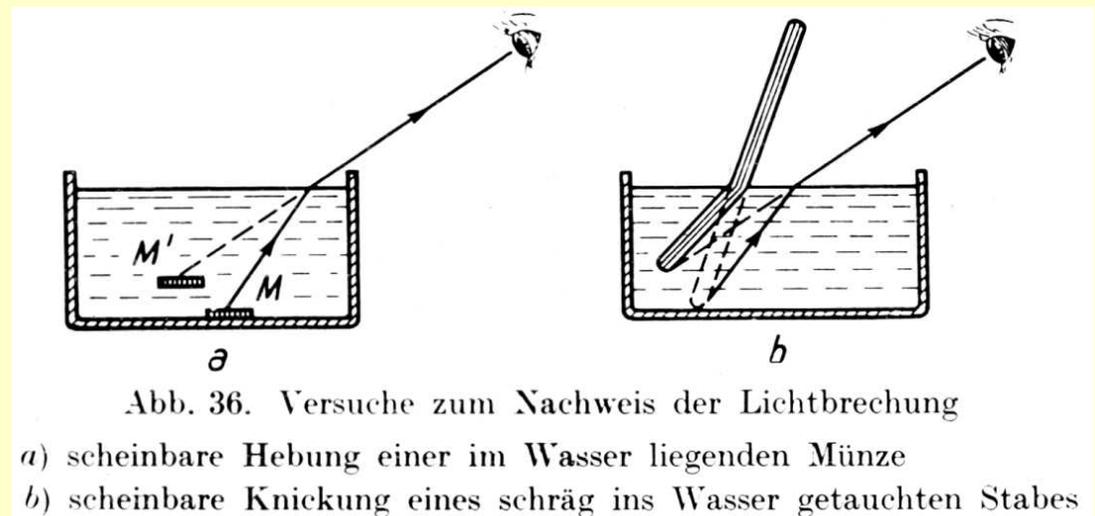
$$n_1 = \frac{c_0}{c_1}$$

Brechungsindex=
Vakuumlchtgeschwindigkeit/
Lichtgeschwindigkeit im Medium

Reflexion

$$\alpha_1 = \alpha_1'$$

Lichtstrahlen bleiben bei Reflexion und Brechung in einer Ebene.



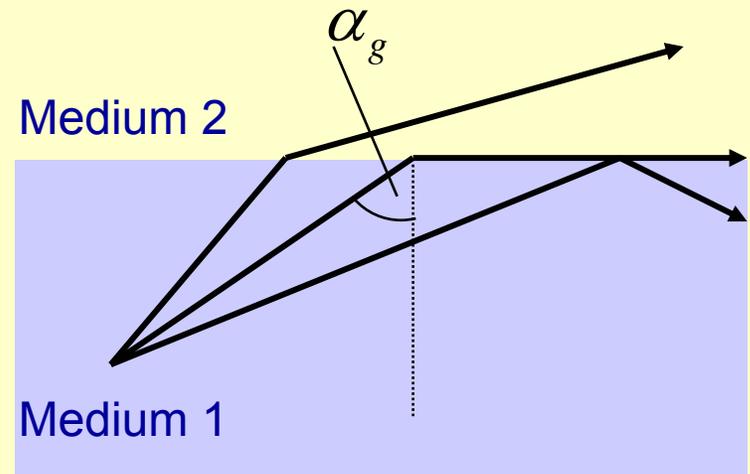
Totalreflexion

Totalreflexion

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

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

$\underbrace{n_1}_{< 1}$

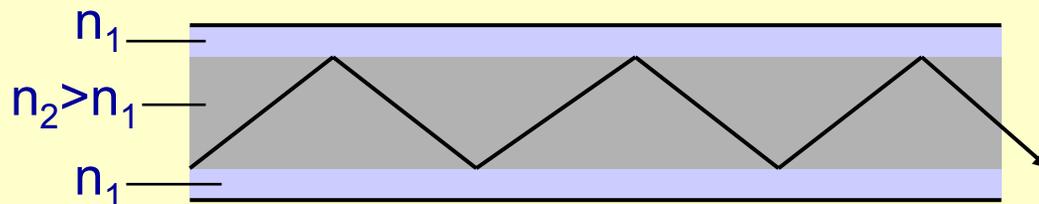


Für $\alpha_2 = 90^\circ$ $\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1}$ Grenzwinkel der Totalreflexion

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

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

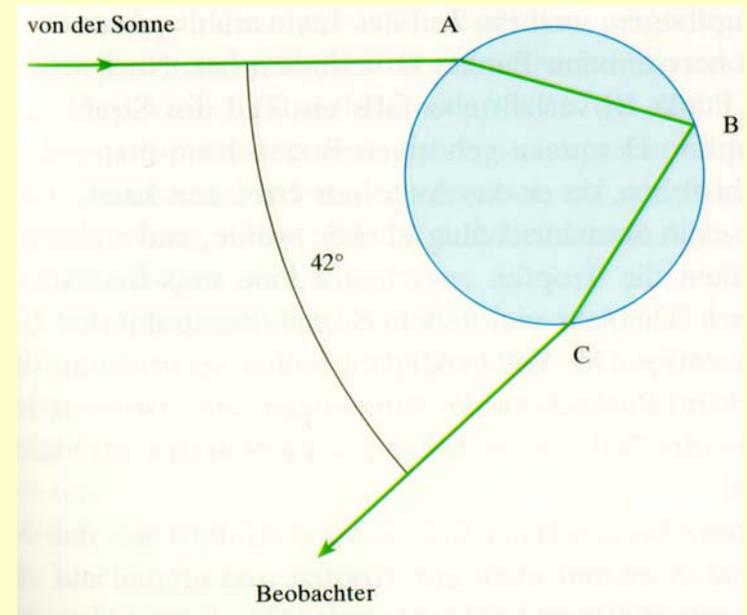
Lichtleiter



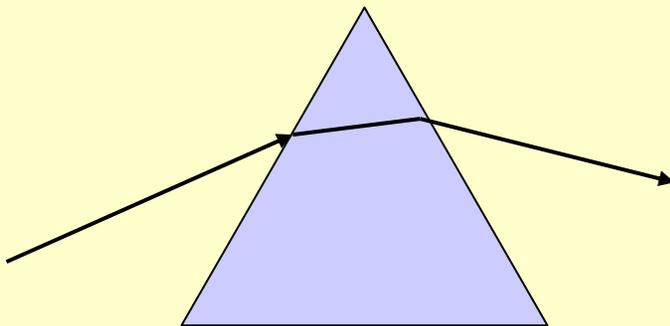
Endoskopie
Datenübertragung

Prisma und Regenbogen

Regenbogen: Reflexion und Brechung am Regentropfen

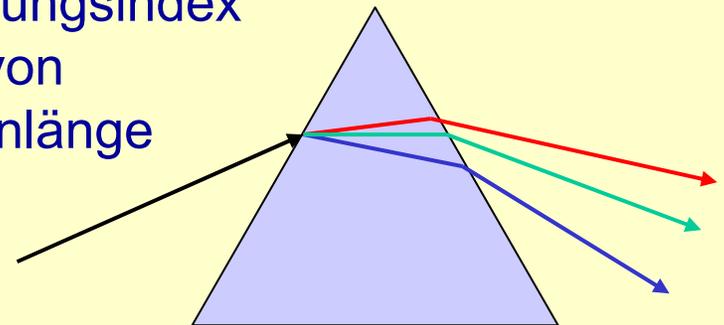


Brechung



Dispersion: $n = n(\lambda)$

Brechungsindex
abh. von
Wellenlänge



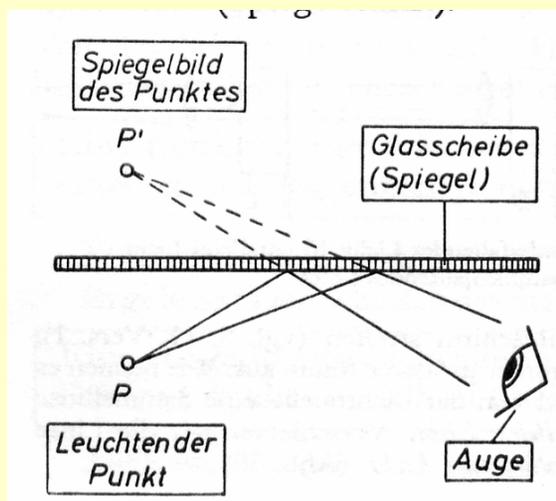
spektrale Zerlegung des Lichtes

Experimente zur Geometrischen Optik

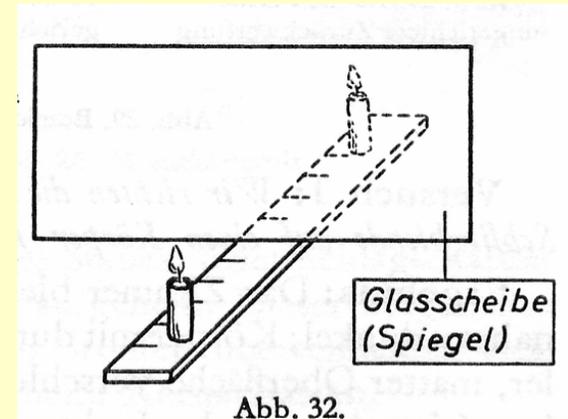
Experimente (Geometrische Optik):

- 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

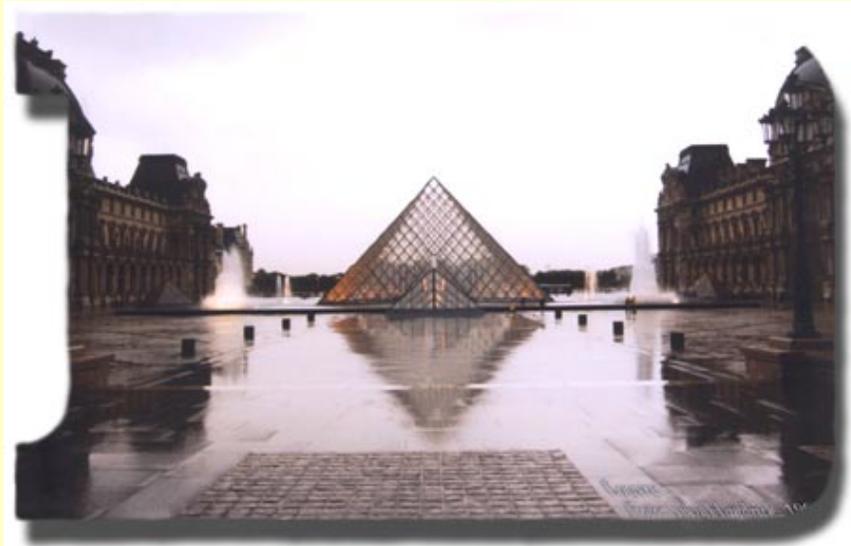


Planspiegel



Reelles Bild kann auf Schirm abgebildet werden

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



Spiegelung in
einer Pfütze

Hohlspiegel

Brennpunkt F (Fokus) Mittelpunkt M

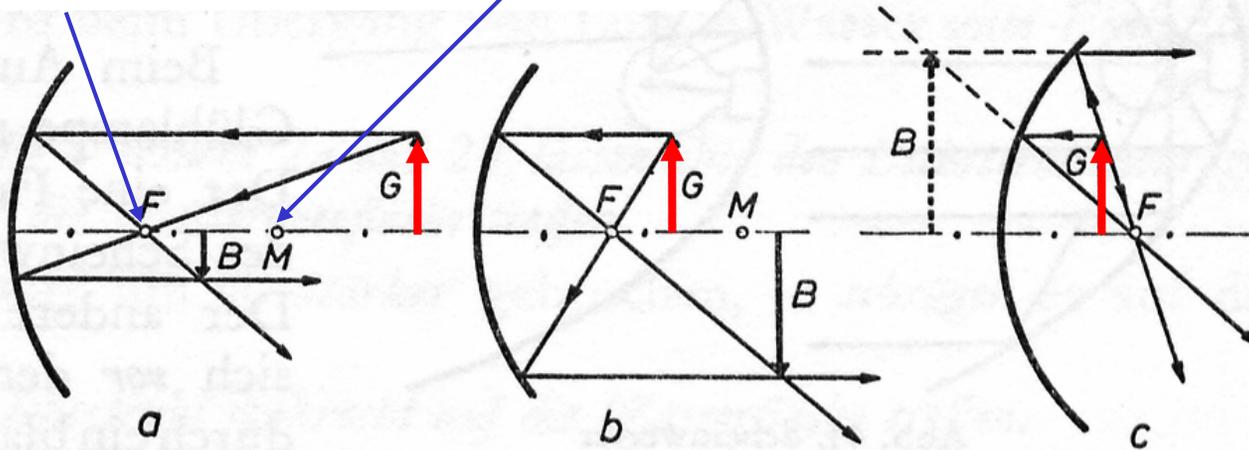
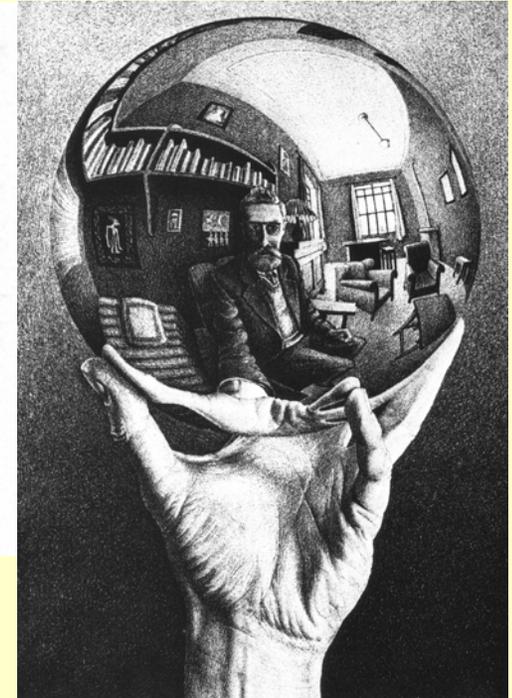


Abb. 42. a—c Bilder am Hohlspiegel



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)

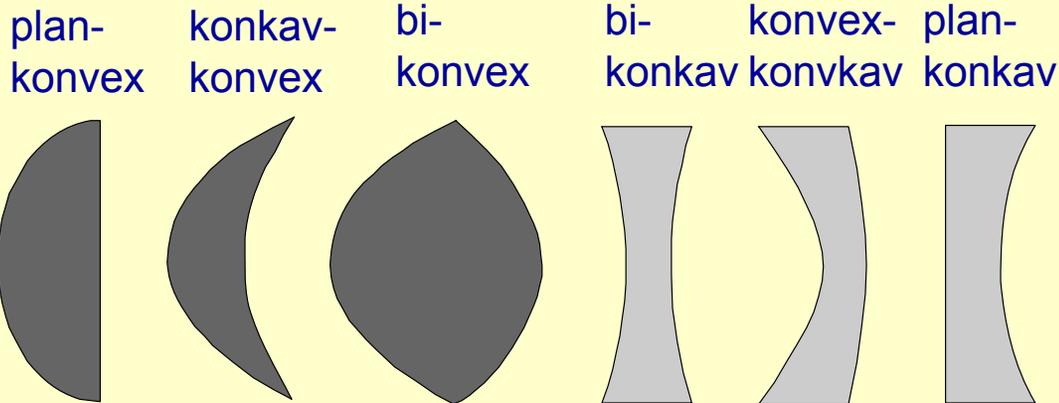
Abb. a und b: reelle Bilder (mit $B < G$ bzw. $B > G$)

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



Zahnarzt-Hohlspiegel

Übersicht Linsen



Abbildungsmaßstab:

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

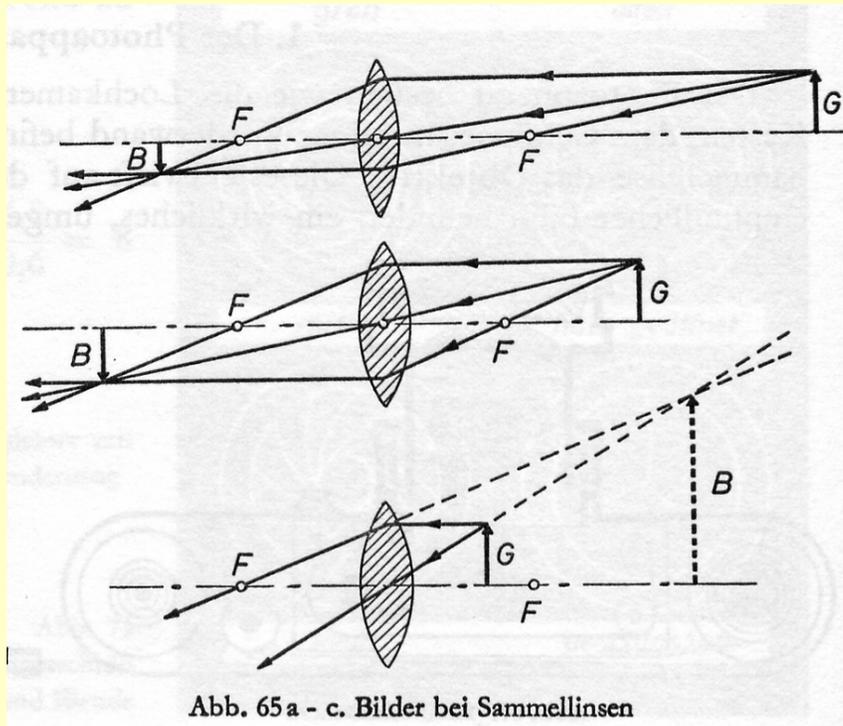
Linsengleichung:

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

g : Gegenstandsweite
 b : Bildweite
 f : Brennweite

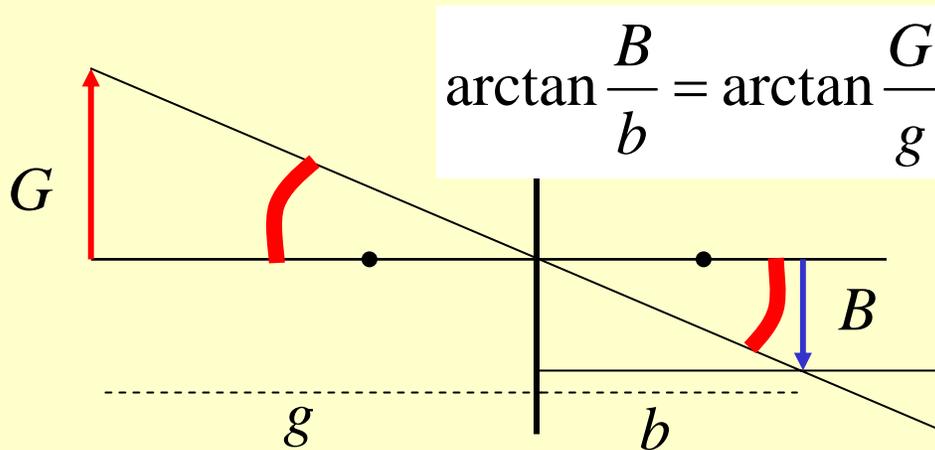
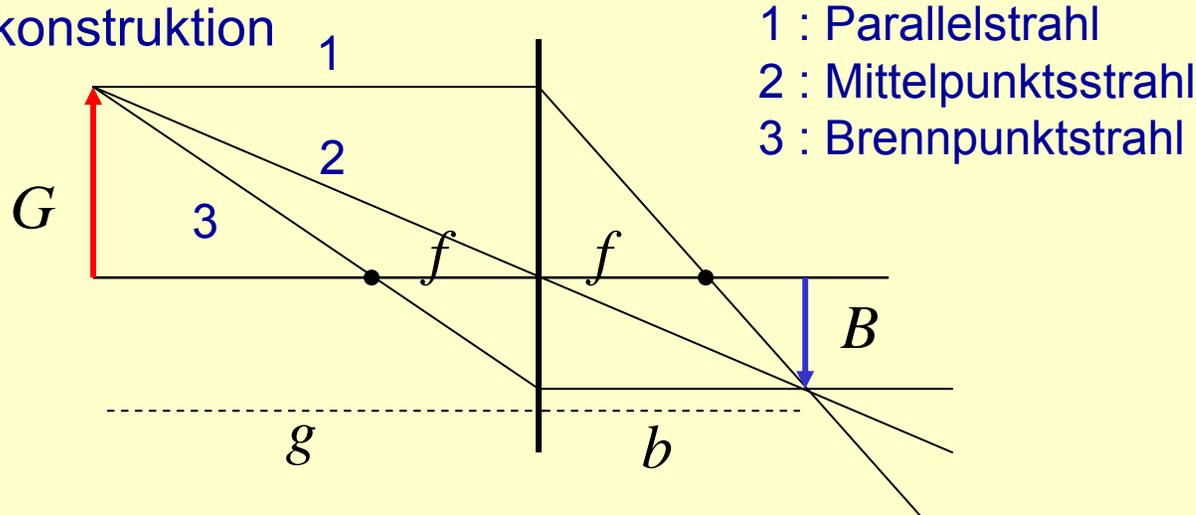
Die Vereinfachung kann nicht immer so angewendet werden, vgl. Auge, dort:

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



Sammellinse 1

Bildkonstruktion



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

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

bzw.

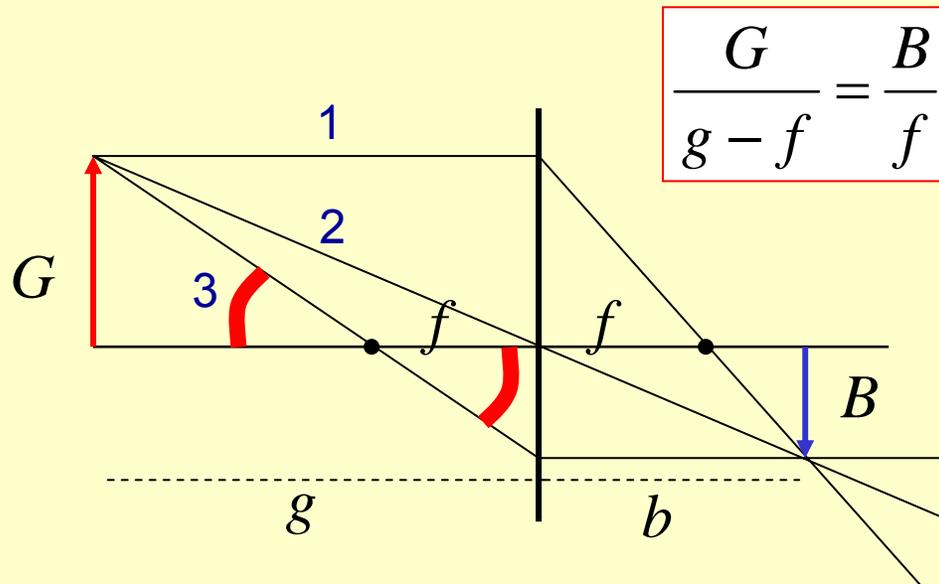
$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

Also Abbildungsmaßstab

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

Sammellinse 2

Bildkonstruktion



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

setze Abbildungsmaßstab

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

ein:

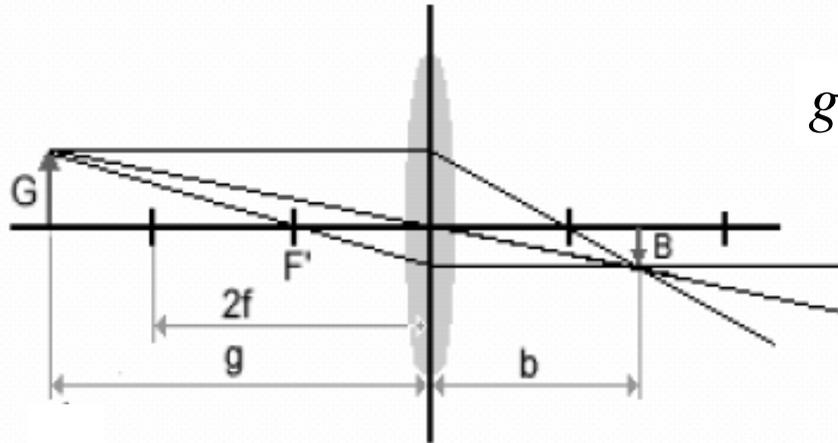
$$\frac{1}{g-f} = \frac{b}{g} \frac{1}{f}$$

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

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

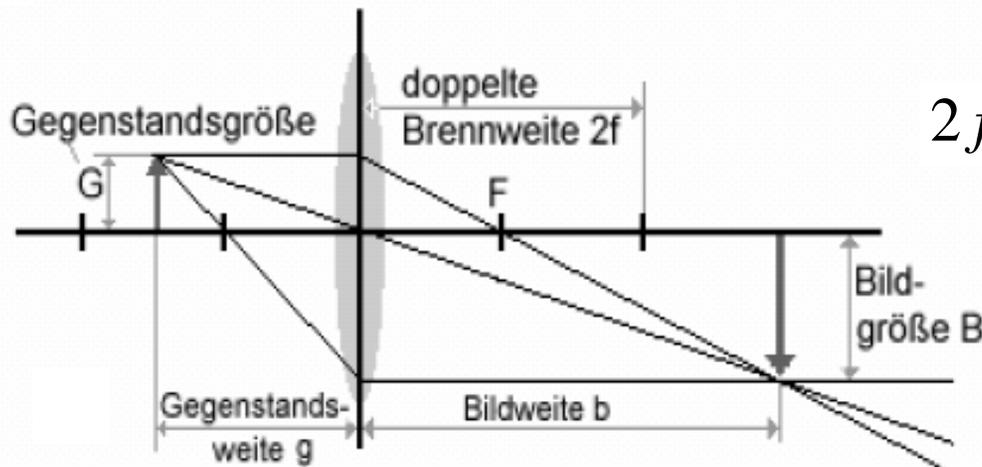
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

Sammellinse 3



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

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



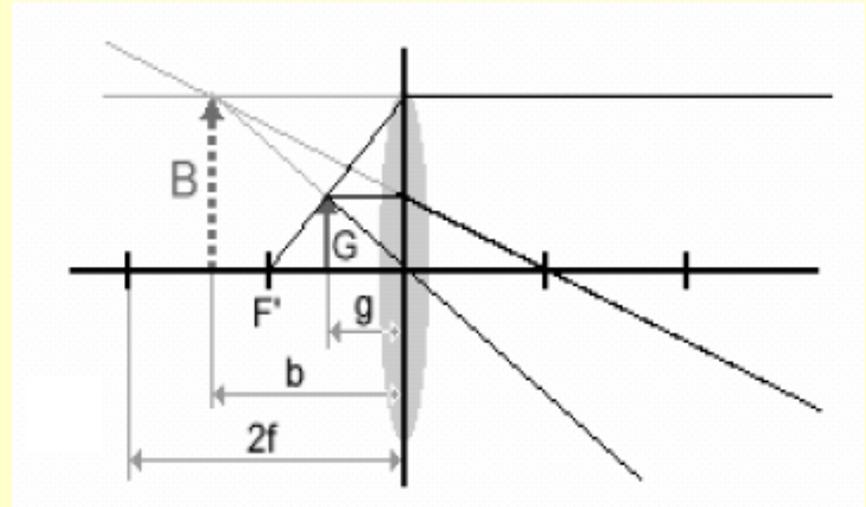
$$2f > g > f \Rightarrow B > G$$

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

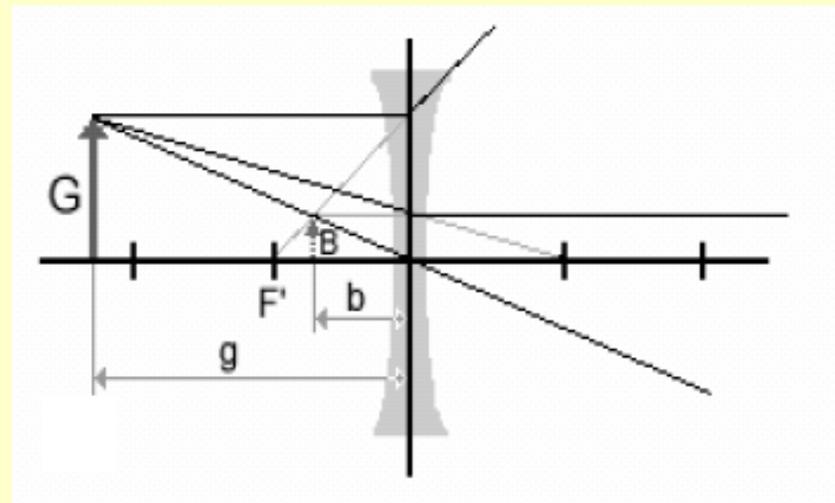
Virtuelle Abbildungen

bei Sammellinsen:

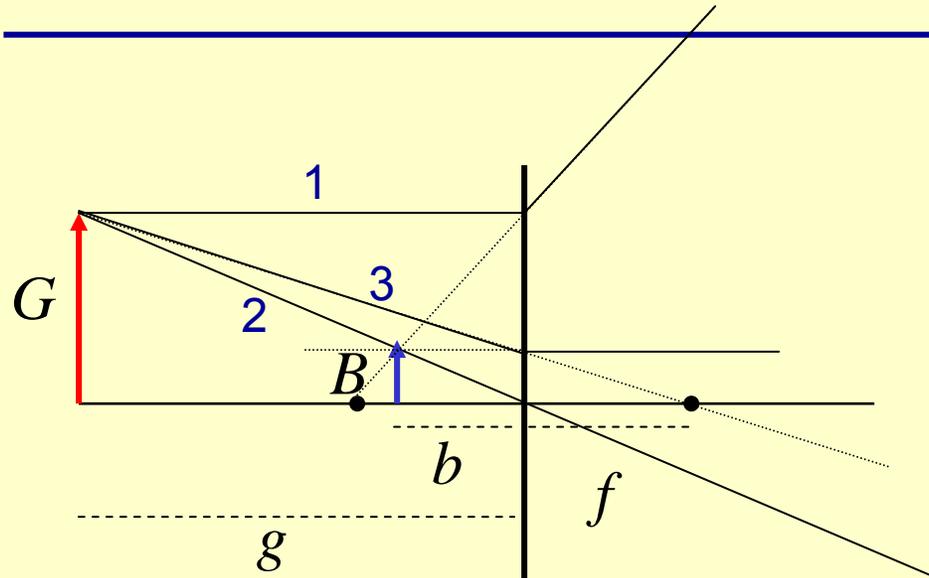
$$g \leq f$$



bei Zerstreuungslinsen:



Zerstreuungslinse



negative Brennweite!

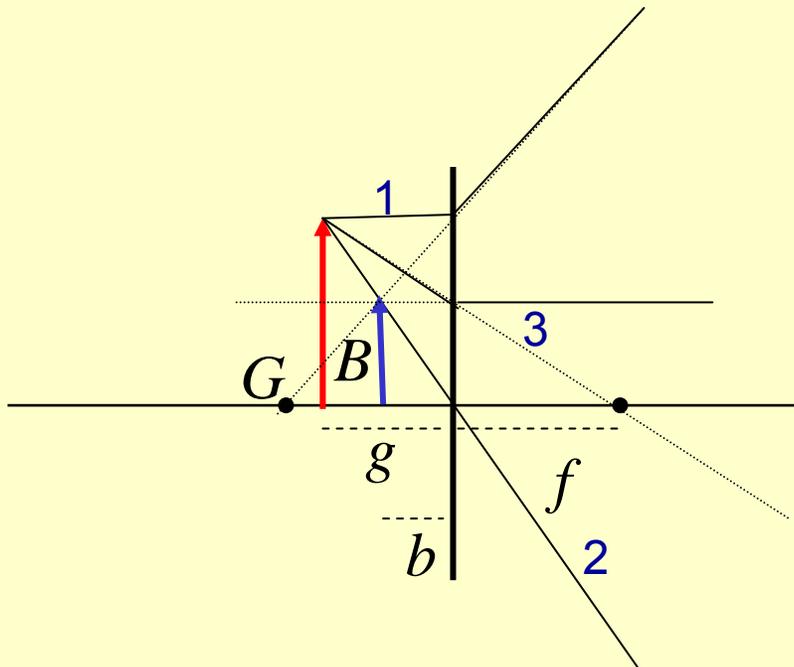
- 1 : Parallelstrahl
- 2 : Mittelpunktstrahl
- 3 : Brennpunktstrahl

**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. $D_2 = -D_1$

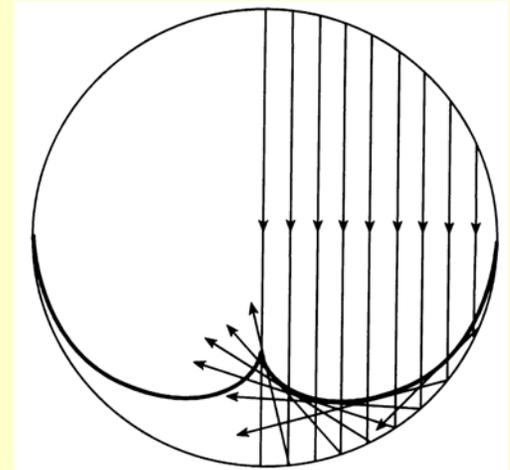
$$f = f_1^2 / d \quad \text{bzw.} \quad D = d D_1^2$$

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

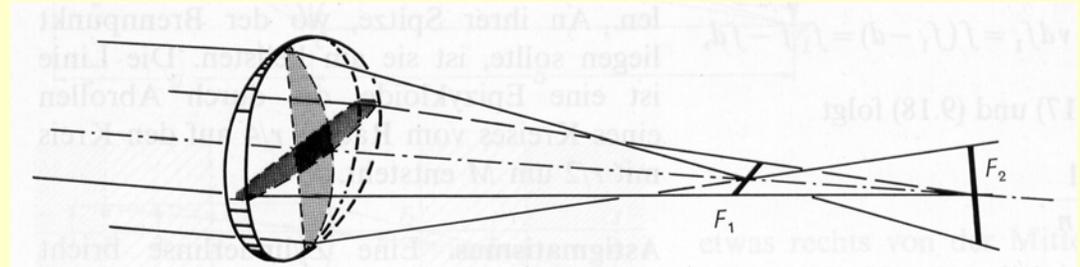
Weitere Linsenkombinationen bei
optischen Instrumenten (Mikroskop, Fernrohr)

Abbildungsfehler

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

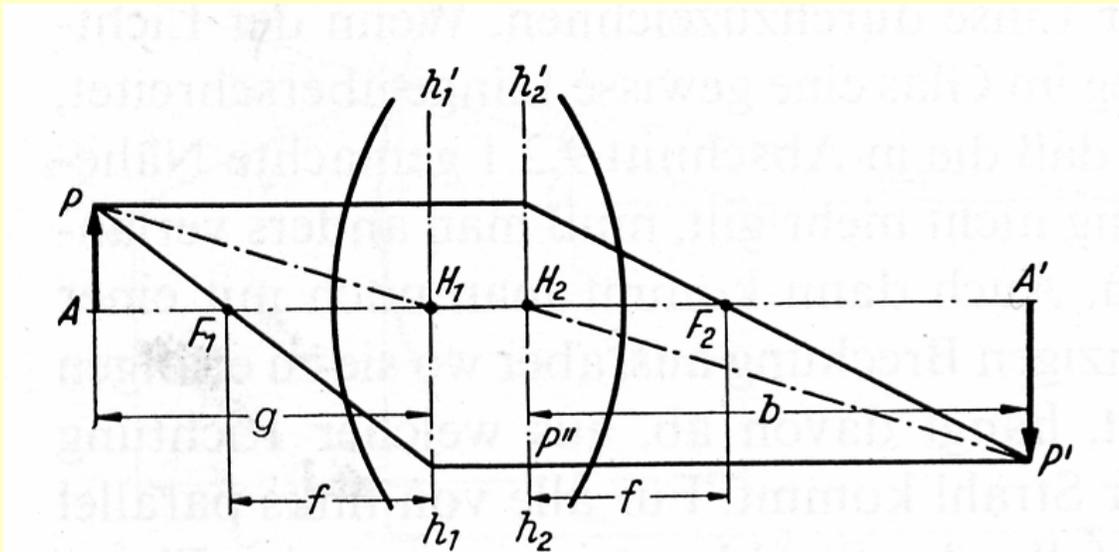


Astigmatismus: In zwei senkrechten Ebenen verschiedene Krümmungsradien und damit verschiedene Brennweiten (Extremfall: Zylinderlinse). Astigmatismus auch bei schrägem Einfall auf sphärische Linse.



Chromatische Aberation: Dispersion verursacht verschiedene 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.

$$e = b + g$$

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

$$d = b - g$$

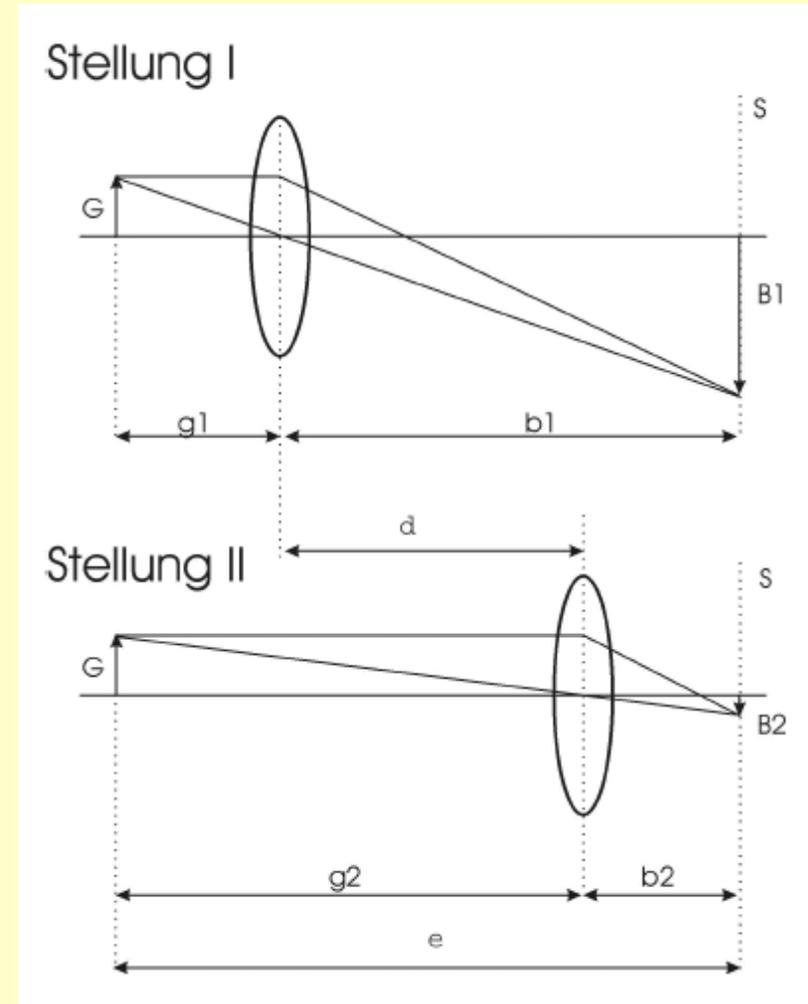
also

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

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

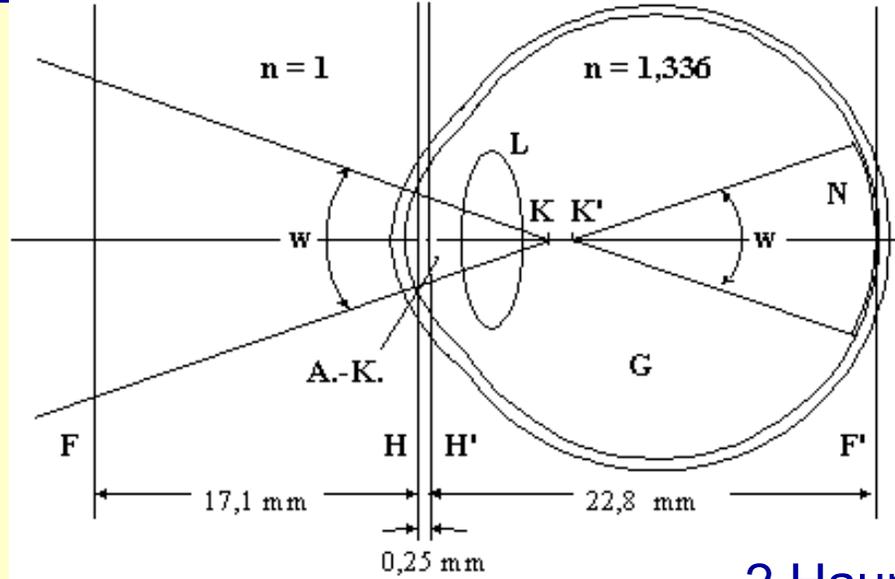
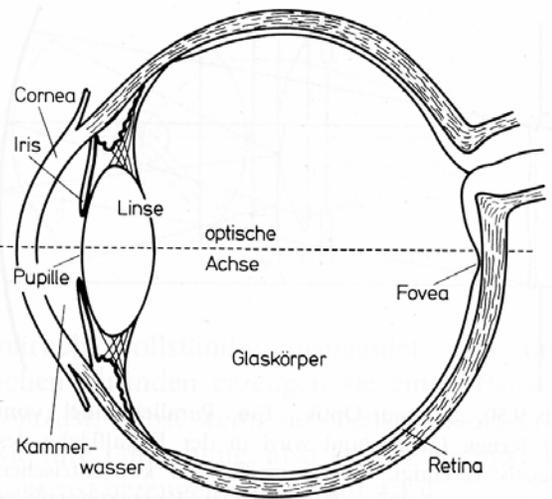
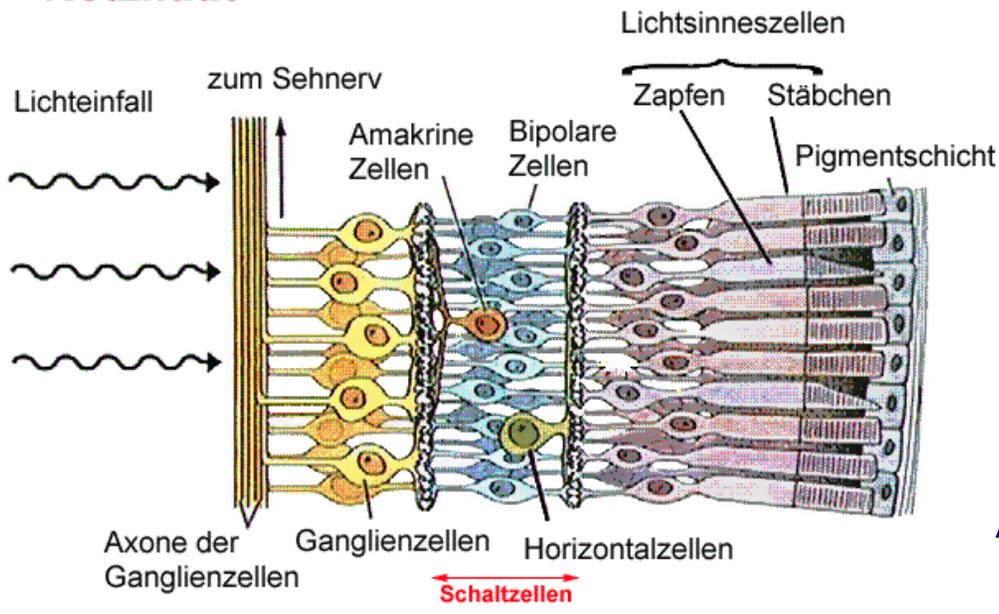


Abb. 9.51. Schnitt durch das menschliche Auge. (Nach H.-U. Harten)

Netzhaut

Richtung der Informationsübertragung



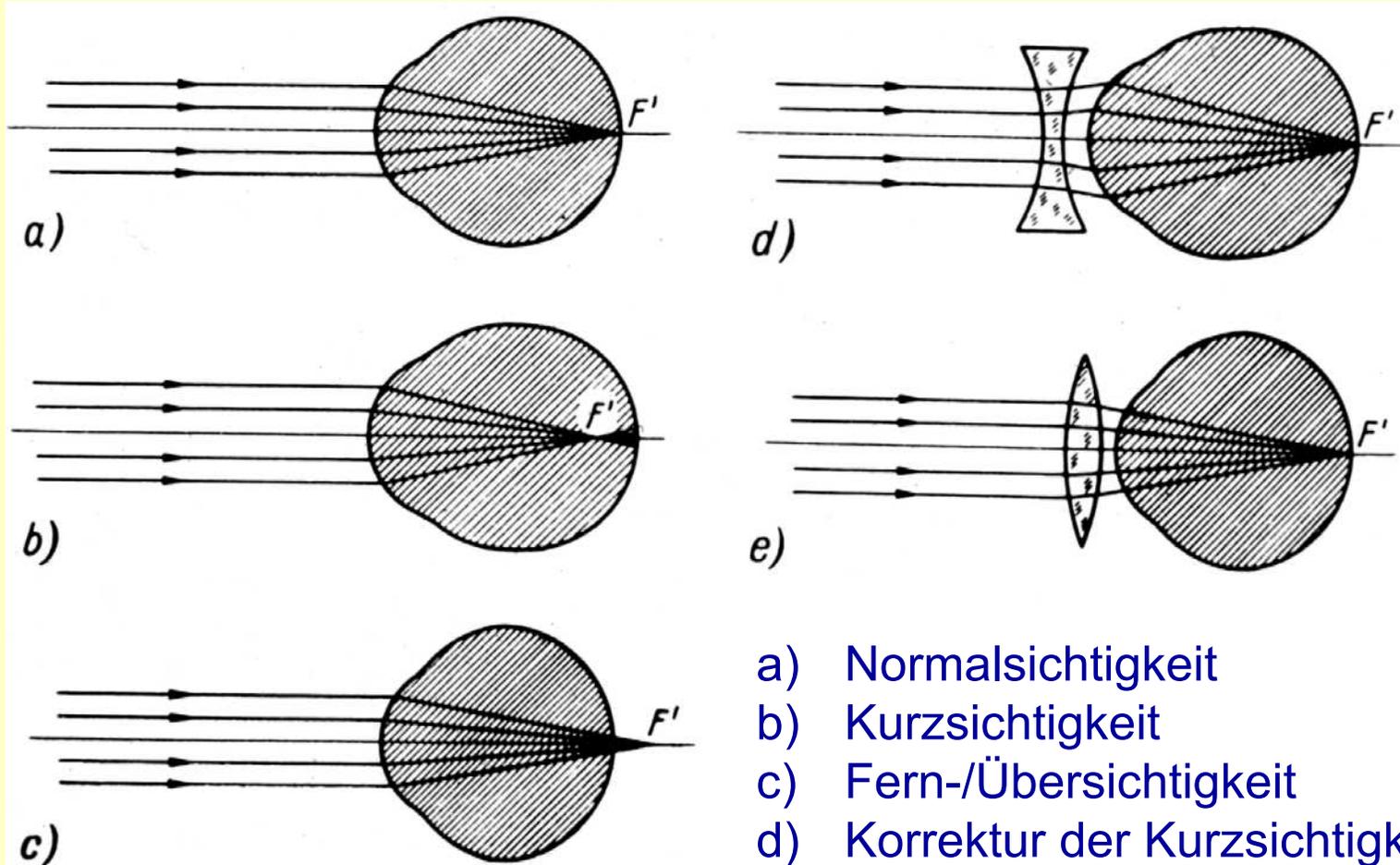
- 2 Hauptebenen
- 2 Knotenebenen
- 2 Brennebenen

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

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

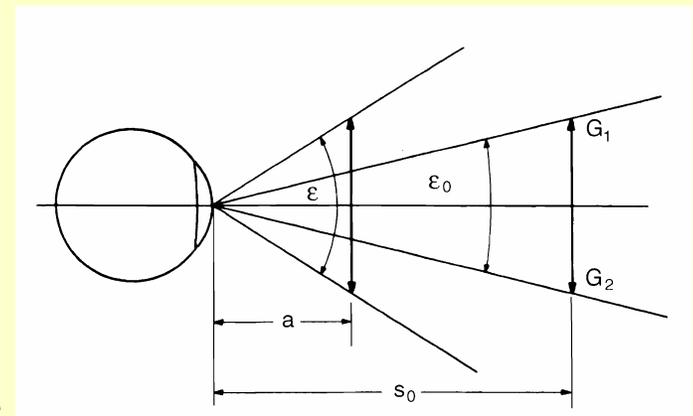
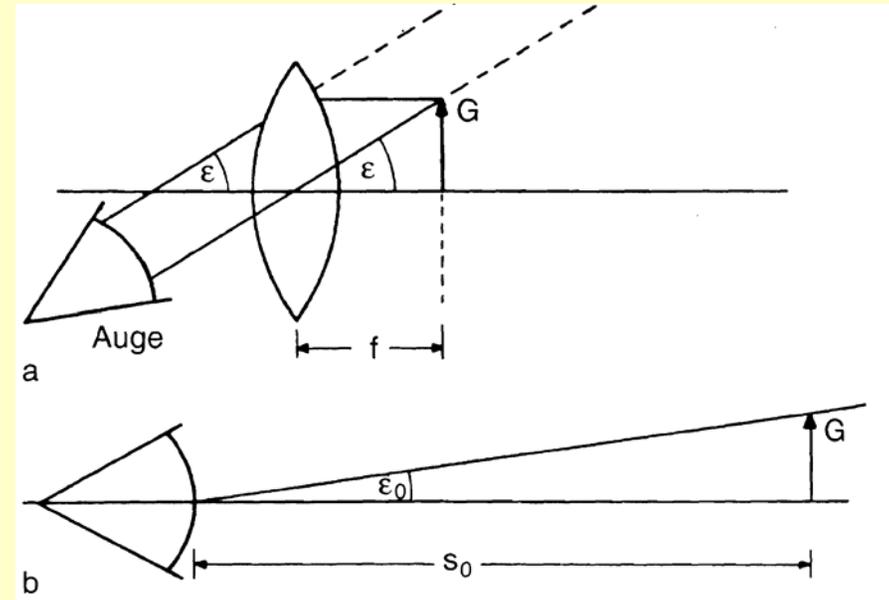
Gegenstandsweite = Brennweite (d.h. Bild im Unendlichen)

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

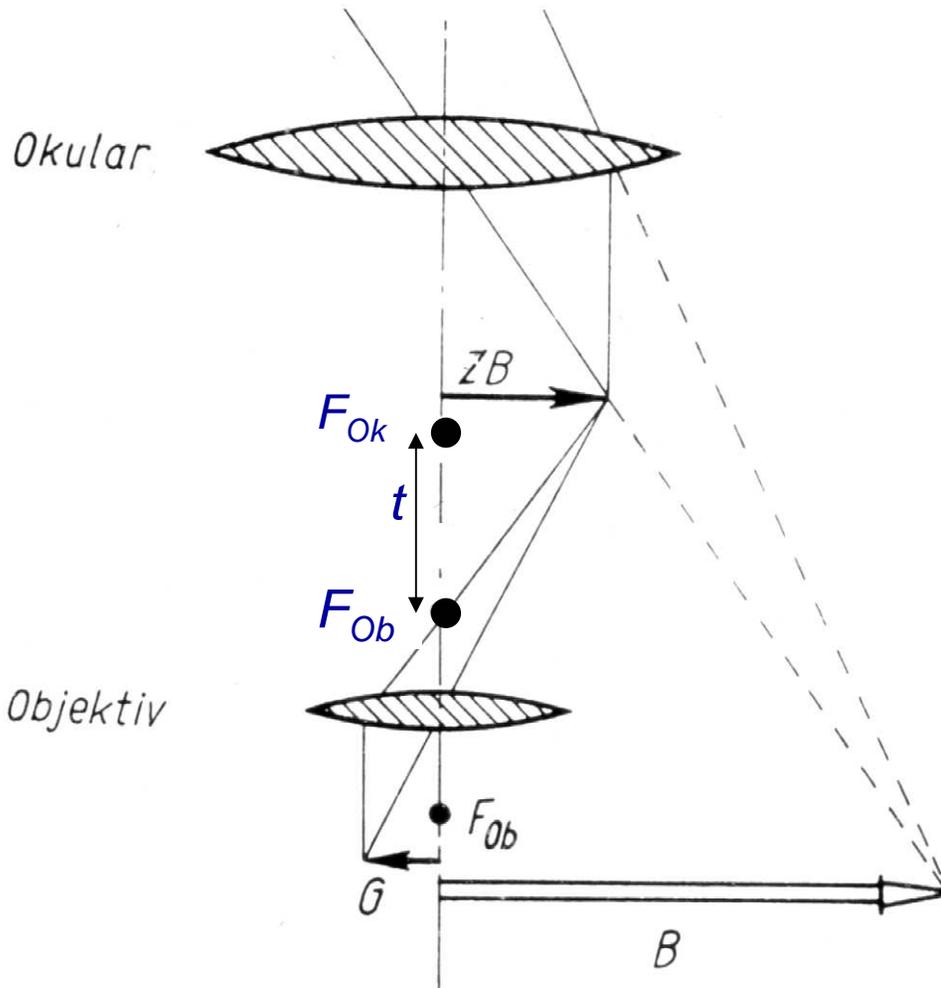
$$s_0 = 25 \text{ cm}$$

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 reelles Zwischenbild (ZB), das durch Okular wie durch eine Lupe betrachtet wird (virtuelles Bild B).

Vergrößerung:

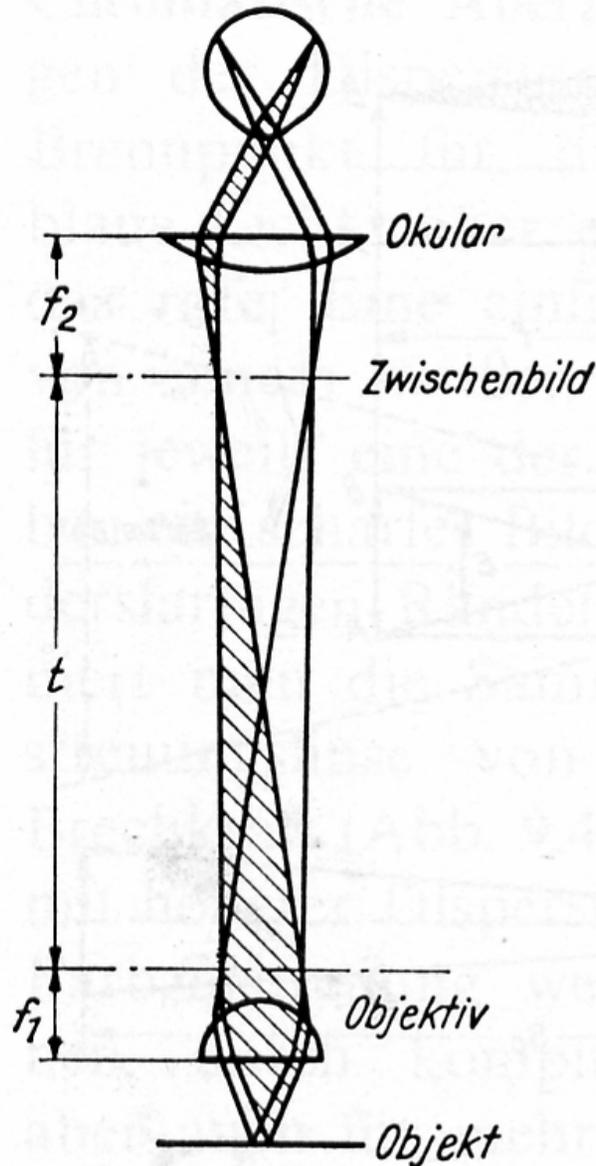
$$V_{ges} = V_{Ob} \cdot V_{Ok} \approx \frac{t}{f_1} \frac{s_0}{f_2}$$

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 : Öffnungswinkel des Strahlenbündels

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

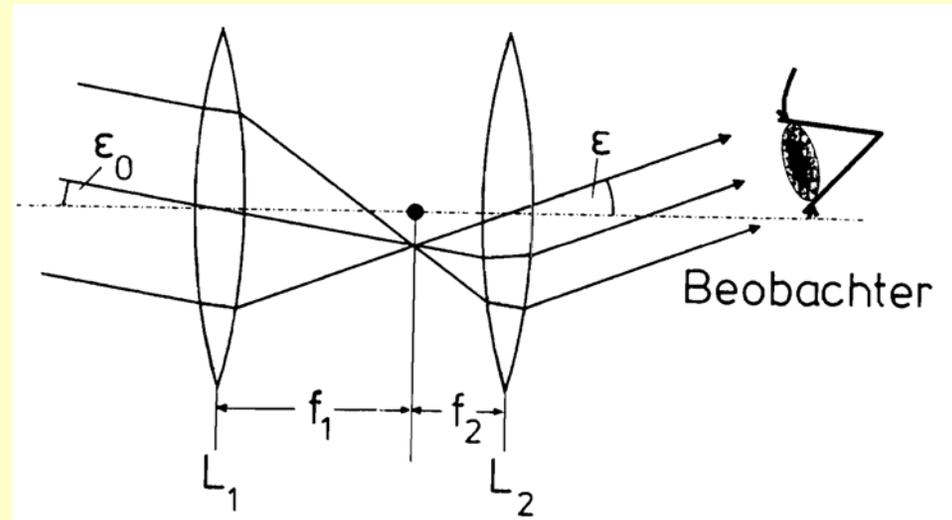
Für hohe Auflösungen verwende
kleinere Wellenlängen, d.h. blaues Licht
Noch höher mit Elektronenstrahlen mit
de Broglie-Wellenlänge

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

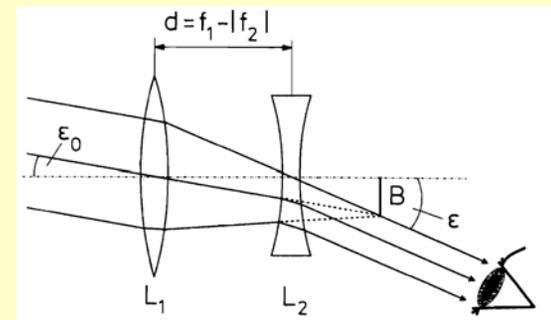
Fernrohre

Gegenstand weit weg (Idealisierung: im „Unendlichen“)
Objektiv führt zu reellem Bild (bei $b = f$), 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)
 \Rightarrow Definiere Blende = f/D
(kleine Blende entspr. großer Lichtstärke vgl. Photokameras)



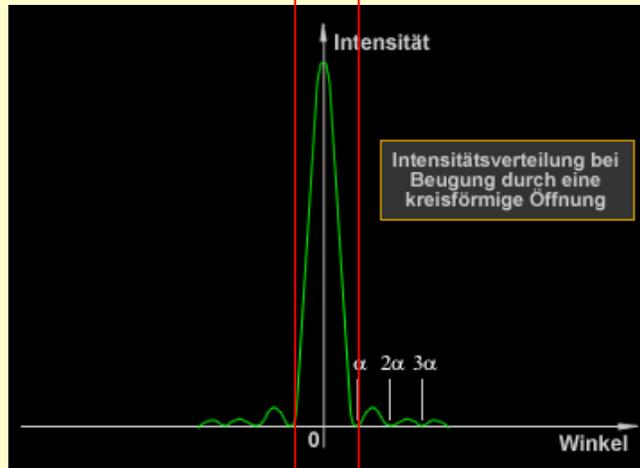
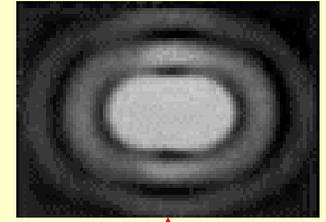
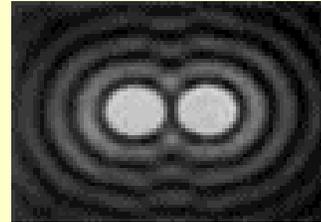
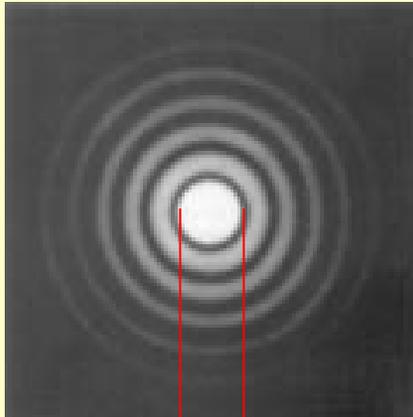
Galilei-Fernrohr: Kombination aus Sammel- und Zerstreuungslinse. Formeln analog.

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

Beugung

Beugungsbild

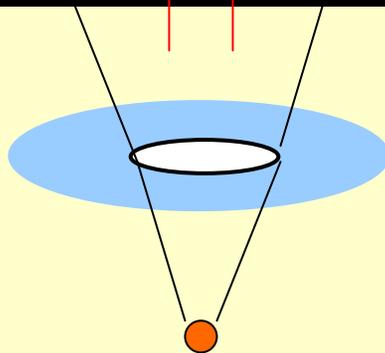


$\alpha > \alpha_C$: 2 getrennte Objekte

$\alpha < \alpha_C$: 2 nichtgetrennte Objekte

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

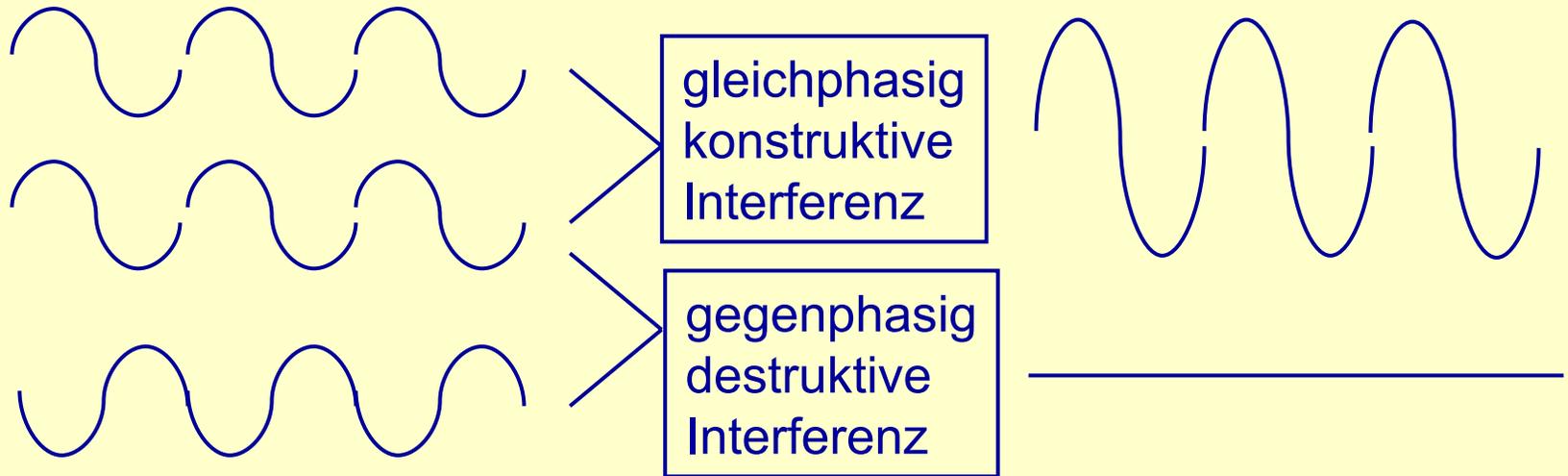
Rayleigh-Kriterium



Lochblende:
Durchmesser d

leuchtendes Objekt

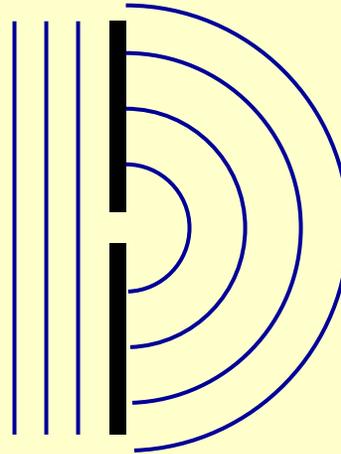
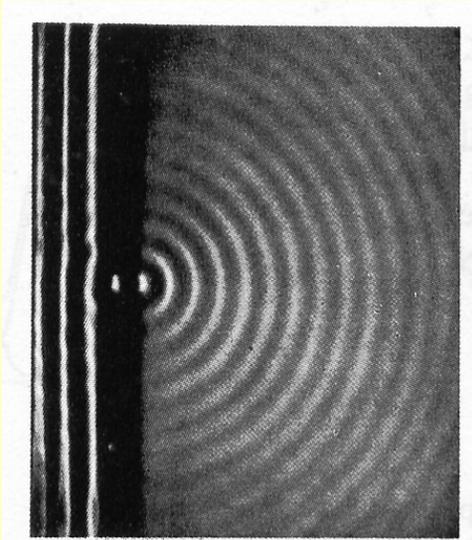
kohärente (phasenstarre) Überlagerung



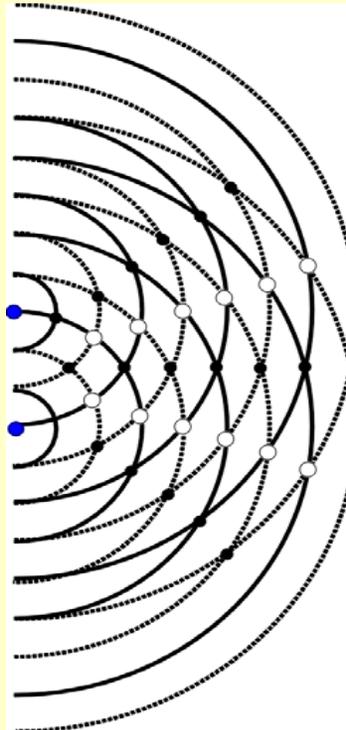
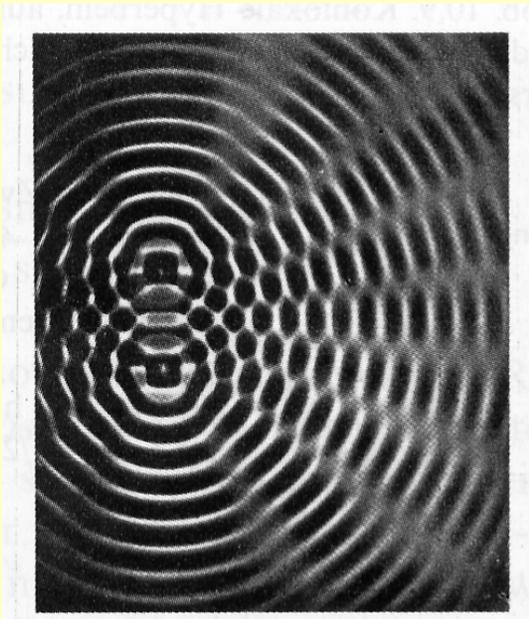
Huygenssches Prinzip:

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



Interferenz und
Beugung am
Doppelspalt

Interferenz am Doppelspalt

Beugungsmaxima:

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

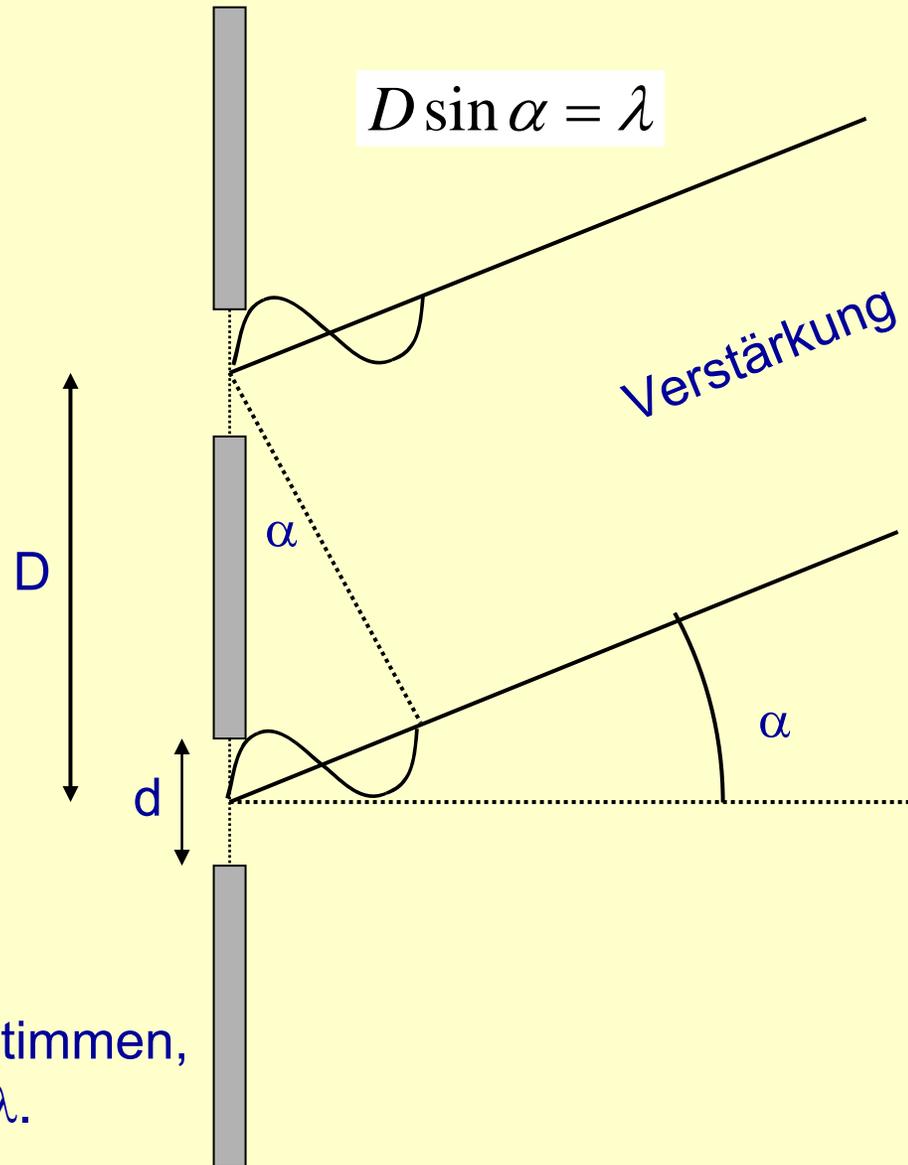
Beugungsminima:

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

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

Beugungsmaxima:

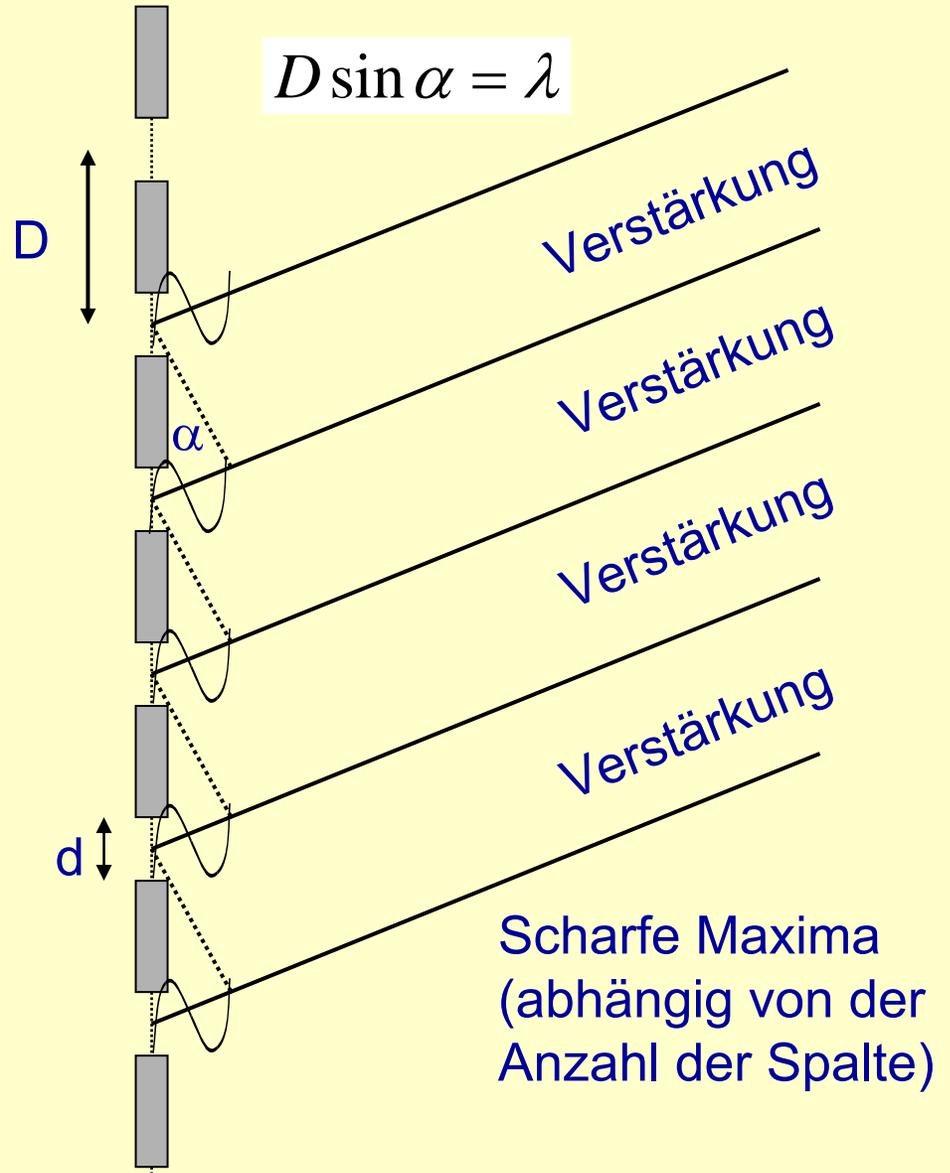
$$D \sin \alpha = n \lambda$$

Beugungsminima:

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

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

D : Spaltabstand

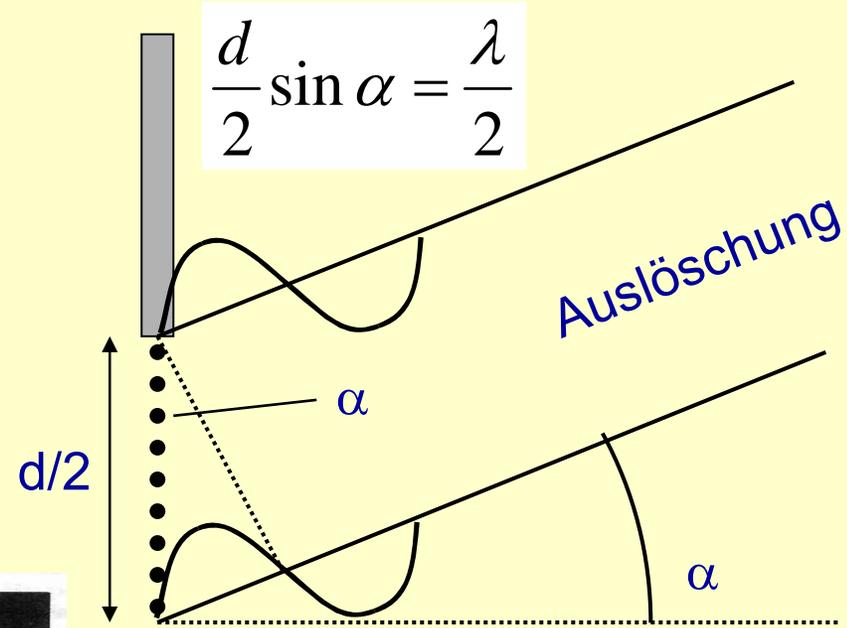
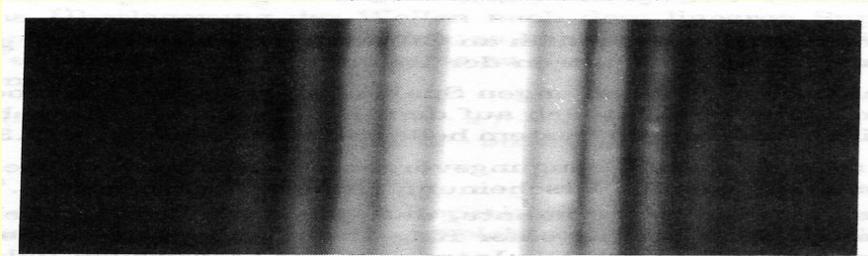
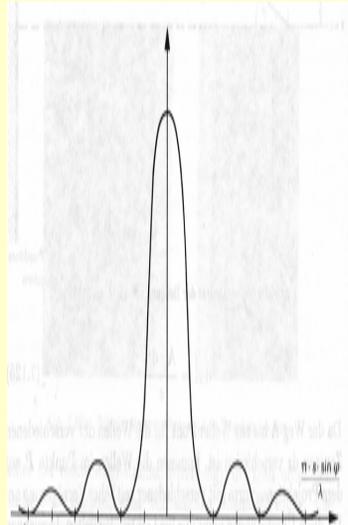


Beugung am Einzelspalt

$$d \approx \lambda$$

Beugungsbild und Intensitätsverteilung

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 $\alpha = 0$!

Beugungsmaxima:

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

Beugungsminima:

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

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.

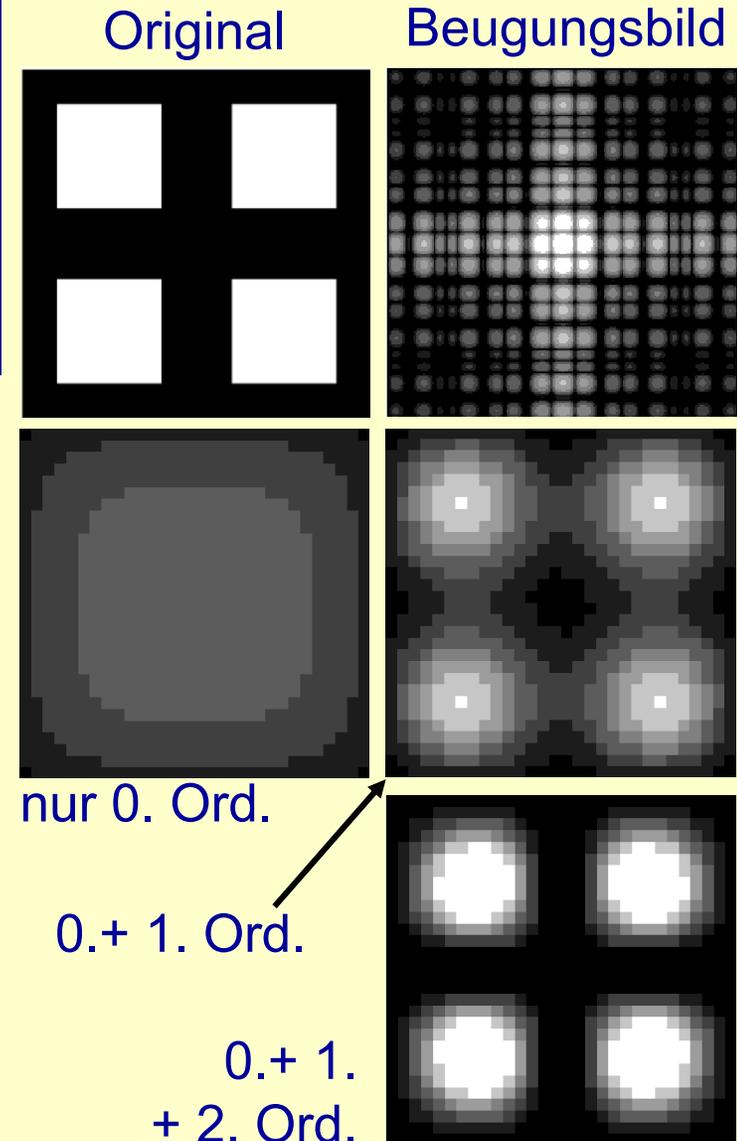
Auflösung bei:

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

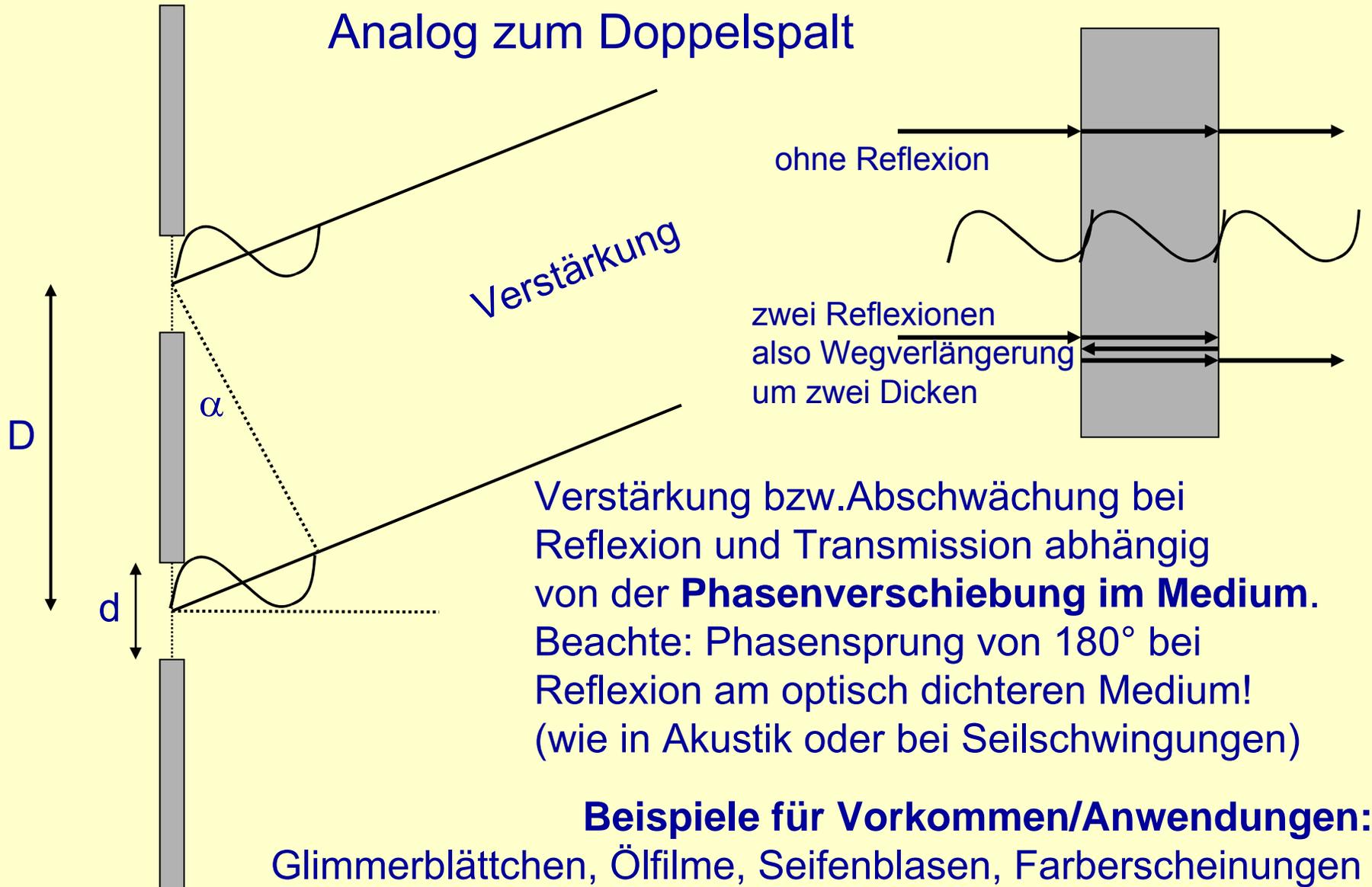
Immersionsmikroskopie $\Delta s = 200 \text{ nm}$

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**

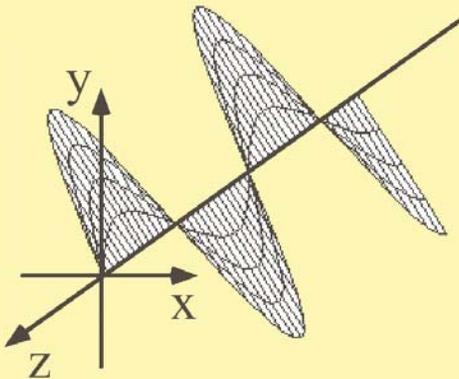
Schwingungsrichtung von E-Feldvektor und H-Feldvektor sind **senkrecht** zur Ausbreitungsrichtung

Polarisationsrichtung: Schwingungsrichtung des E-Feldvektors.

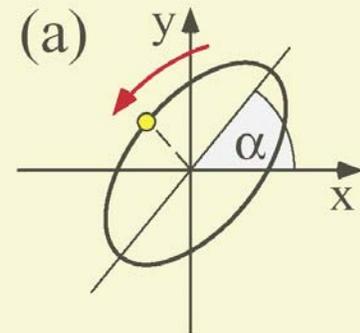
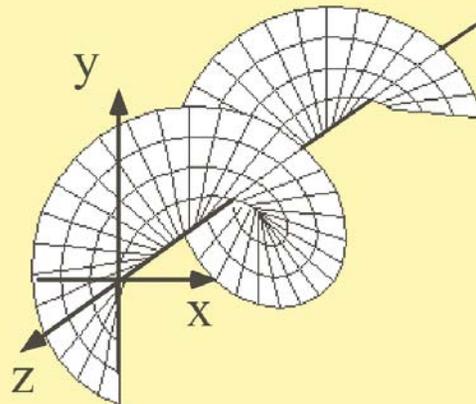
Polarisation

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

Linear polarisierte Welle



Zirkular polarisierte Welle



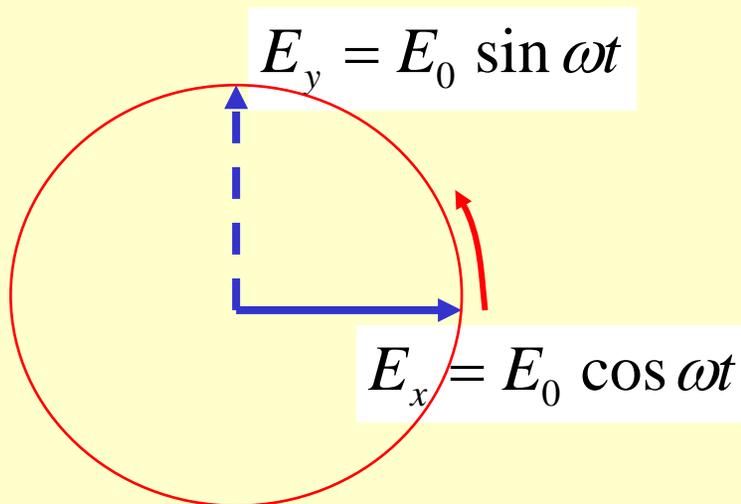
Elliptisch polarisiertes Licht

Zirkulare Polarisation

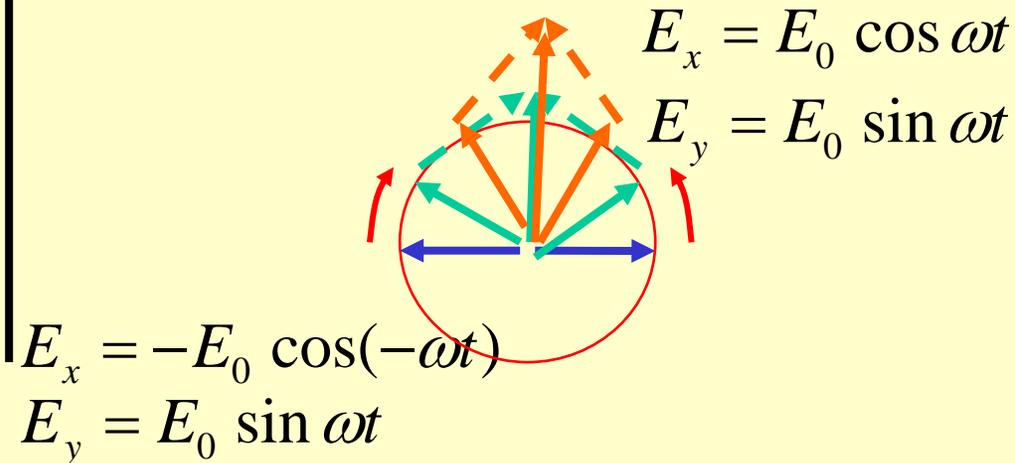
Zirkular und **linear** polarisierte Lichtstrahlen

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:



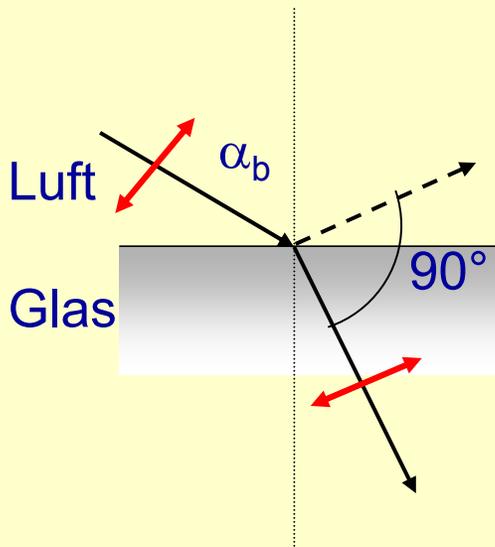
„Doppelbrechung“: Strahlen unterschiedlicher Polarisationsrichtungen haben unterschiedliche Geschwindigkeiten.

=> 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** $\lambda/4$!)

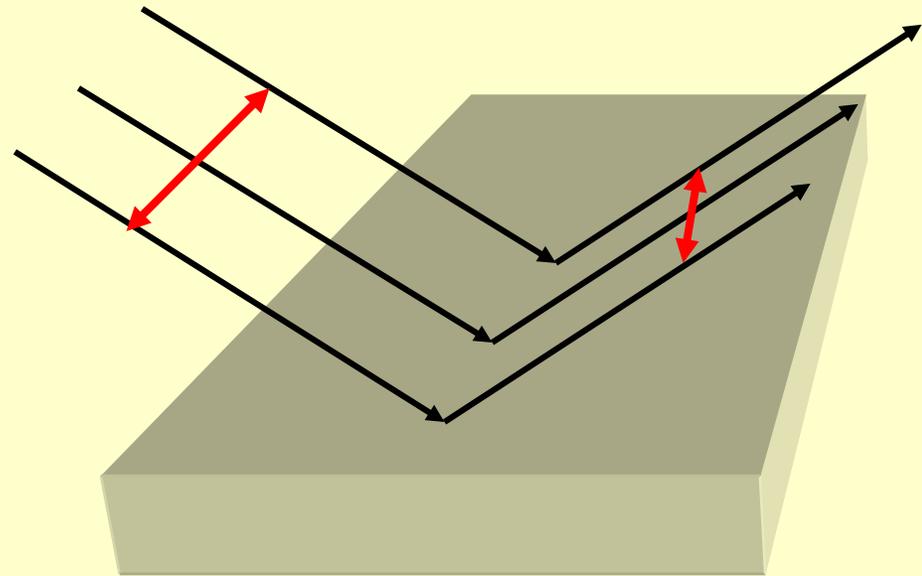
Polarisation durch Reflexion

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

→ Reflektiertes Licht ist vollständig polarisiert!

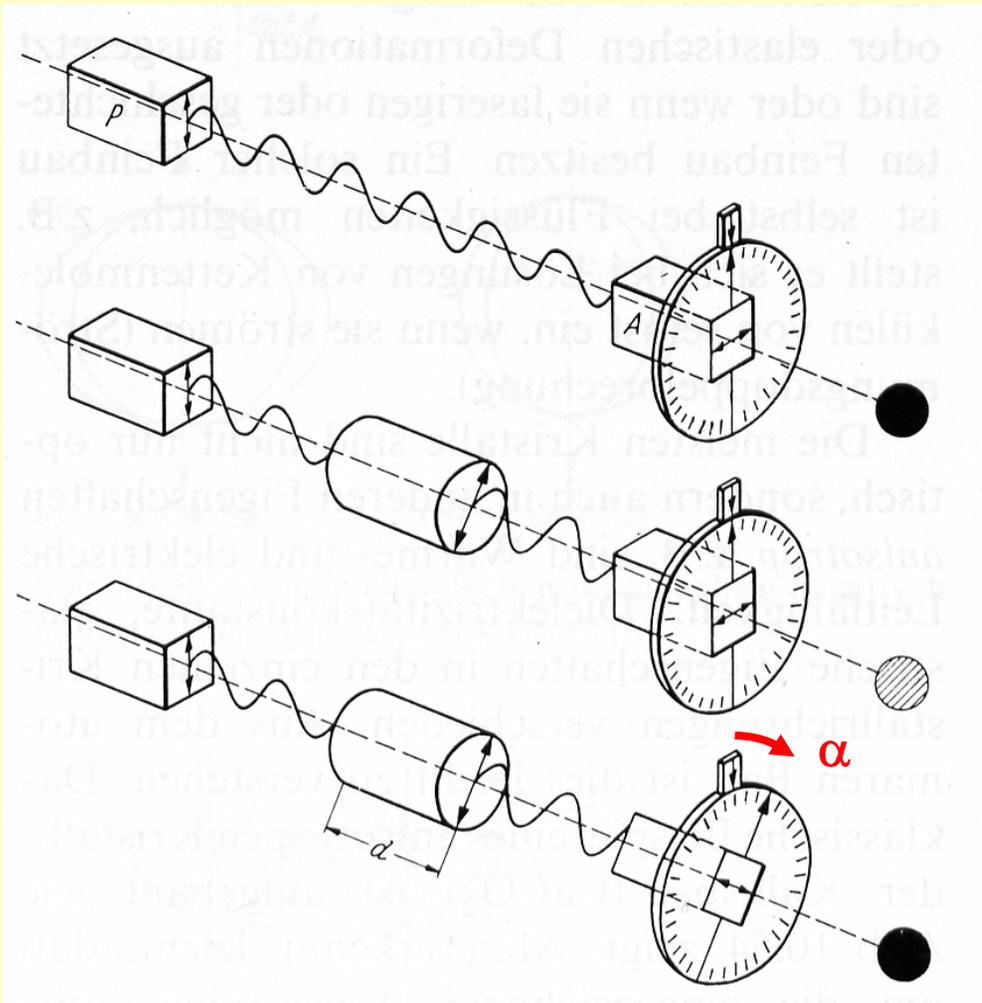


E-Feldvektor parallel zur Einfallsebene und $\alpha = \alpha_b$: Licht wird transmittiert, aber kein Licht wird reflektiert !



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

Polarimetrie



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

$$\text{Drehwinkel} \quad \alpha = \alpha_0 C d$$

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

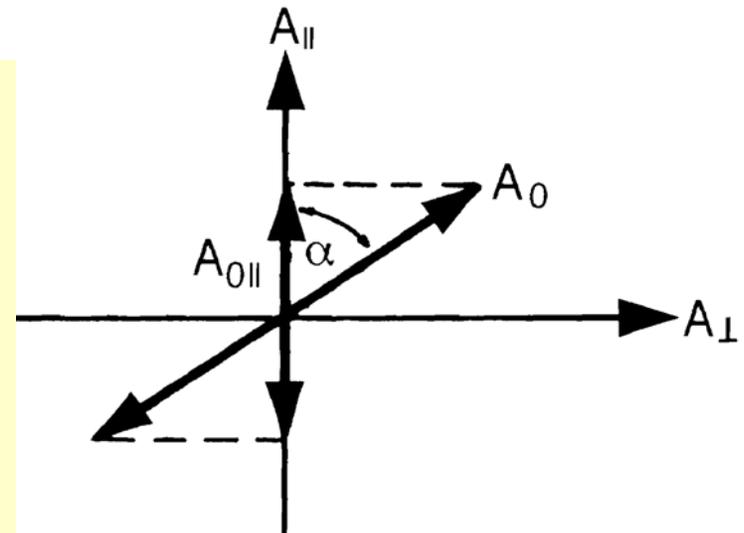
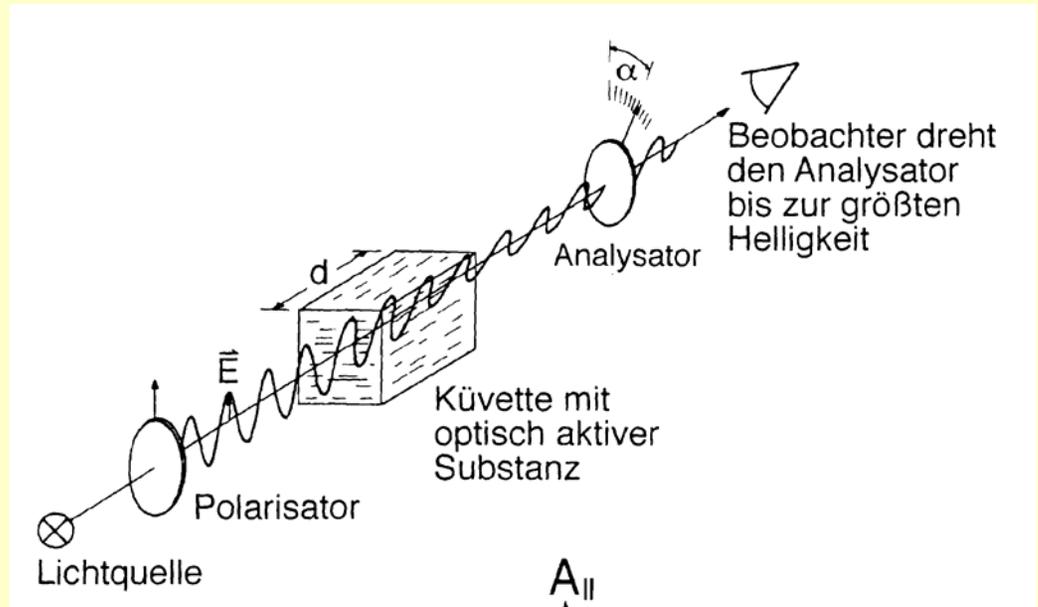
$$A_d = A_0 \cos \alpha$$

⇒ für Intensitäten

$$I \sim A^2$$

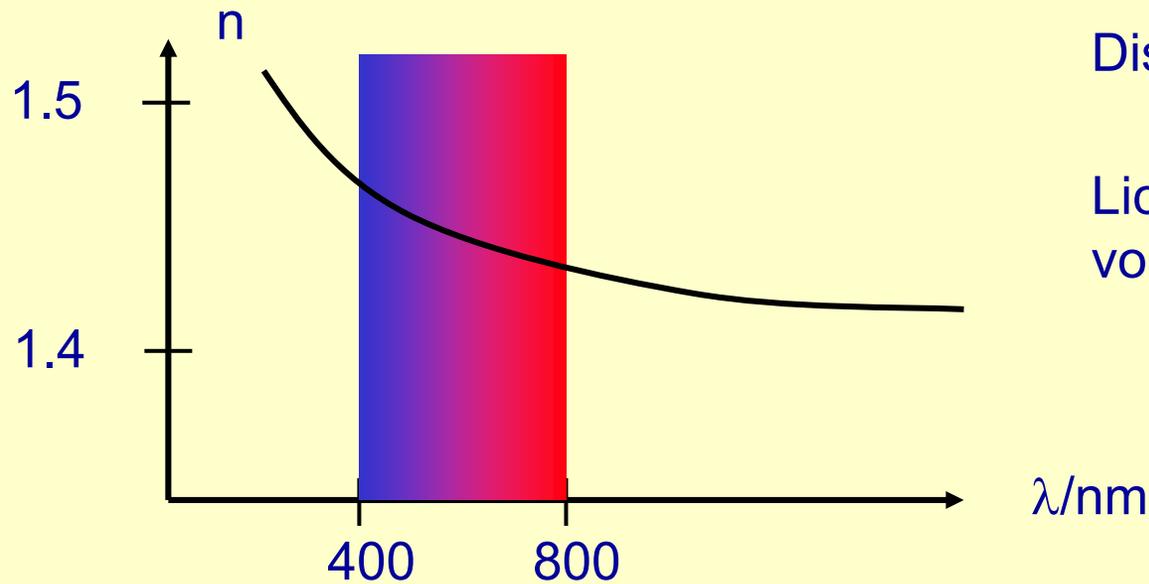
⇒ Gesetz von Malus

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



Lattenzaun-Analogon (Welle auf Seil)
Beachte aber Mikrowellenversuch mit Drahtgitter:
Bei elektr. Feld in Stabrichtung Absorbtion!

Dispersion



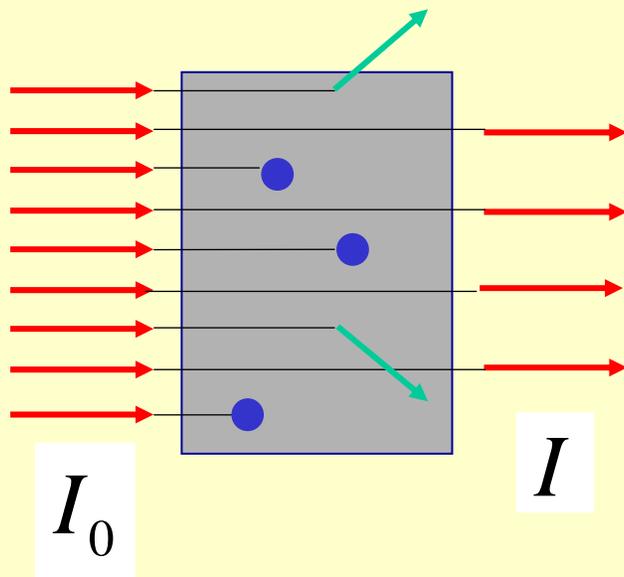
Dispersion: $\frac{dc}{df} \neq 0$

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

Beer-Lambertsches Extinktionsgesetz:

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

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)

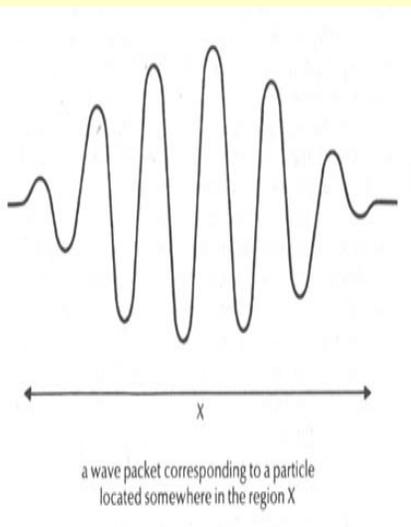
Laser / Welle-Teilchen-Dualismus

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



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

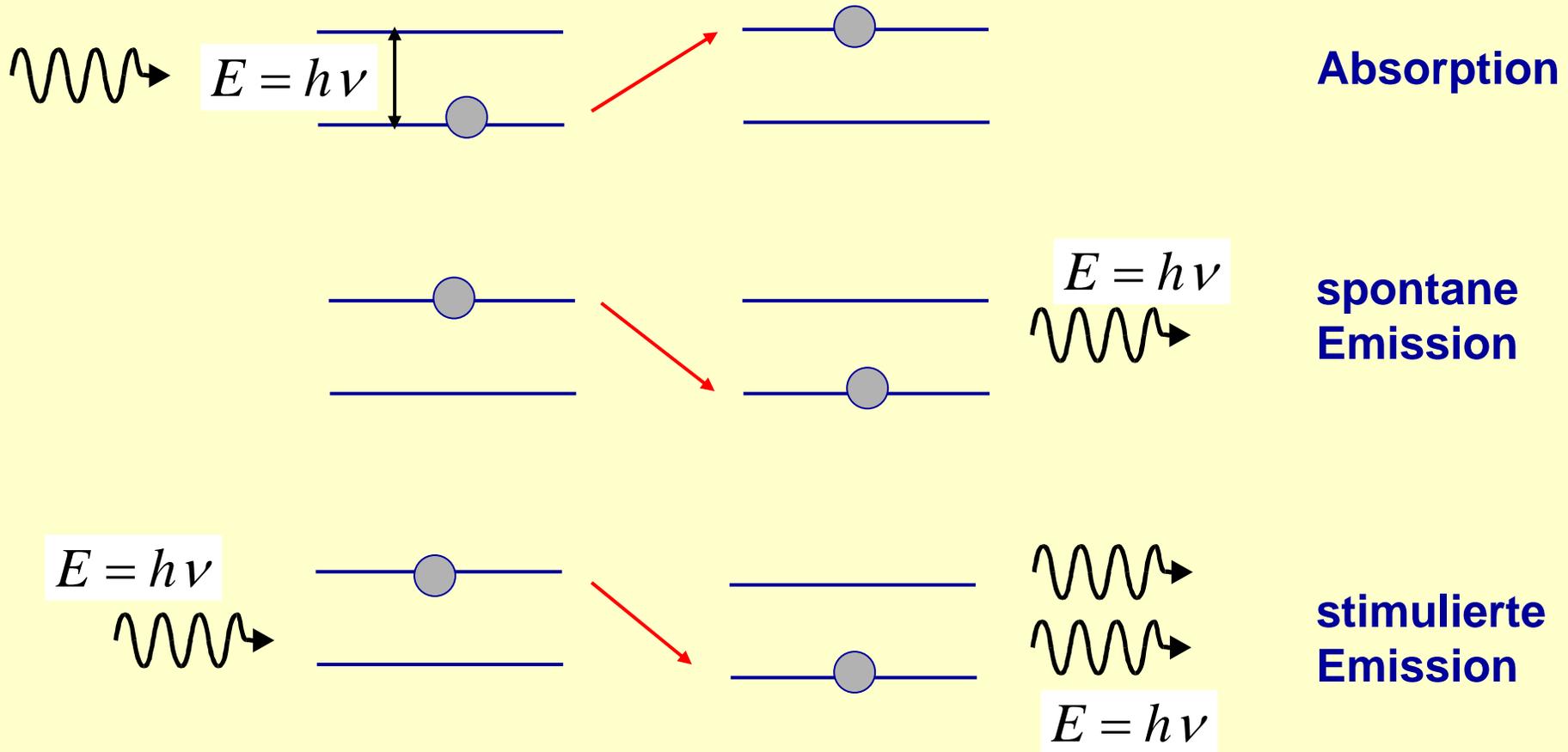
$$E = h\nu$$



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

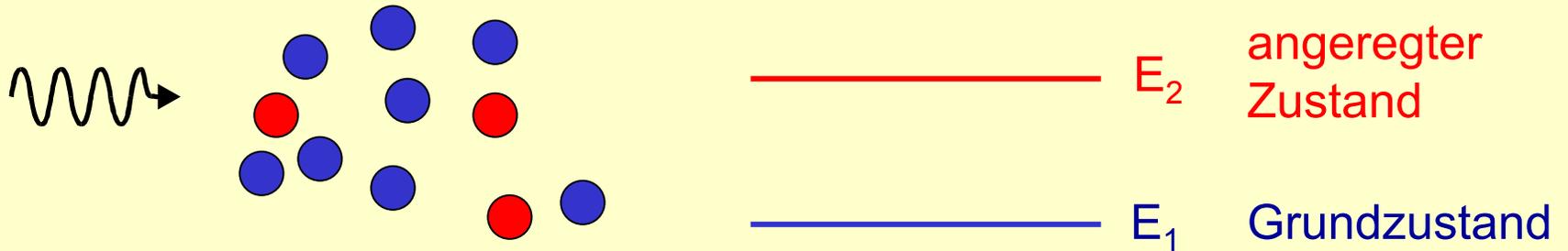
Energiequantum $E=h \cdot f$
Plancksches Wirkungsquantum h
 $h = 6.6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Laser / Elementarprozesse

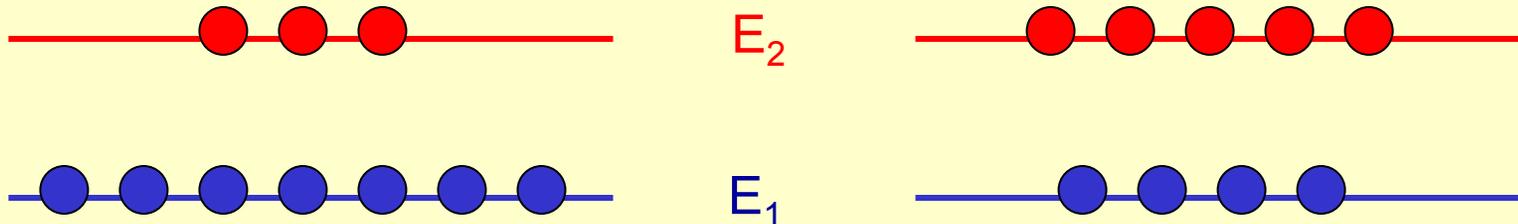


Laserlicht hat - **feste Frequenz** (Wellenlänge): monochromatisch
- **feste Phasenbeziehung**: konstruktive Überlagerung

Laser / Besetzungsinversion



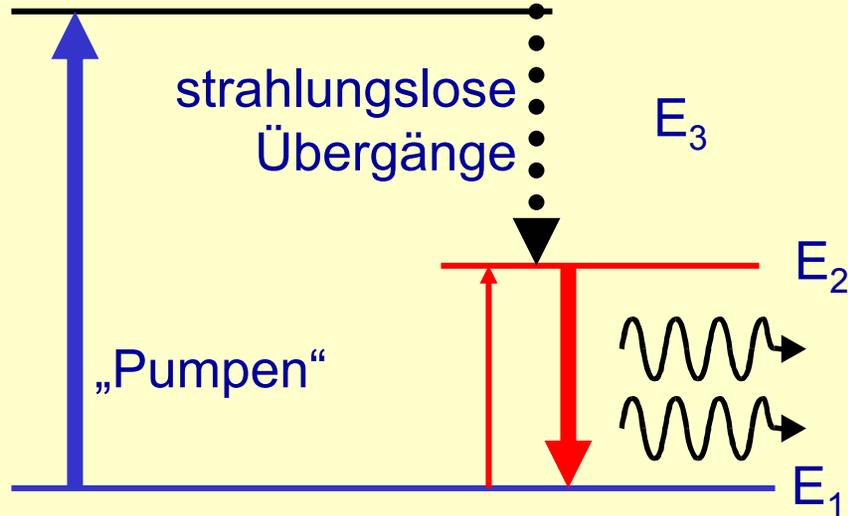
Im thermodynamischen Gleichgewicht: Anzahl N_1 der Atome im Grundzustand E_1 höher derer (N_2) im angeregten Zustand E_2 , d.h. $N_1 > N_2$ und daher: Absorption aus Grundzustand überwiegt stimulierte Emission aus angeregtem Zustand



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

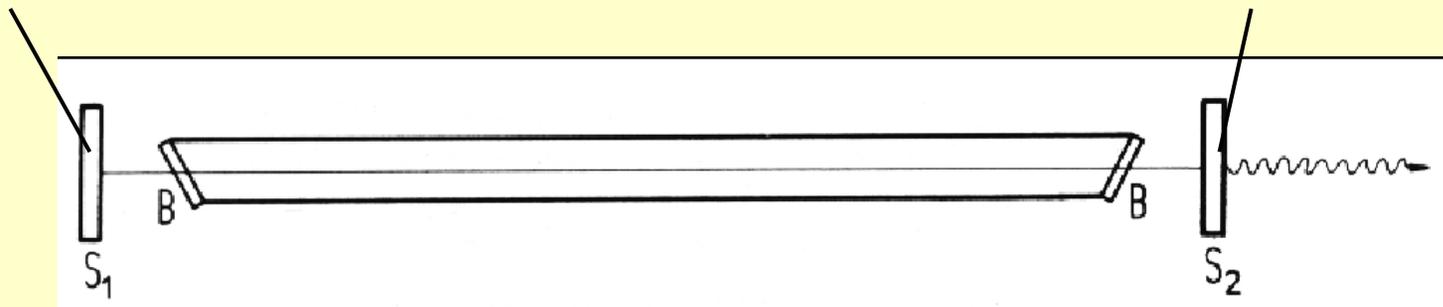
Besetzungsinversion:

- 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:

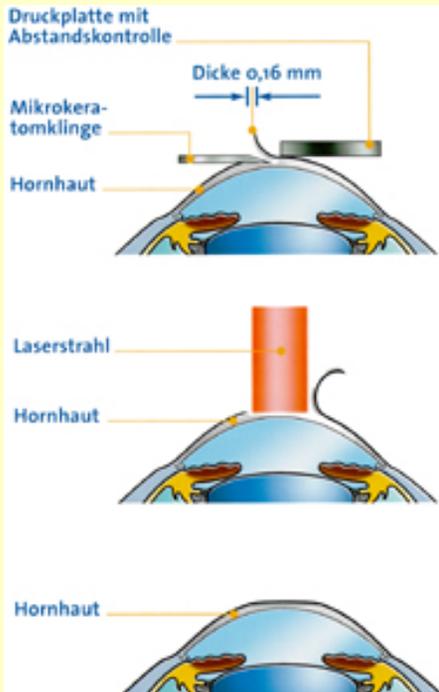
- extrem intensiv
- monochromatisch
- kohärent
- gebündelt

Thermochemische Prozesse: Laserchirurgie
(Koagulieren, Schneiden, Verdampfen)

Photochemische Reaktionen: Photochemotherapie (Nekrotisieren)

Mechanische Effekte (optischer Durchschlag):

Laserchirurgie, Mikrochirurgie



LASIK



Before

Tattoo-
Entfernung



After