

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

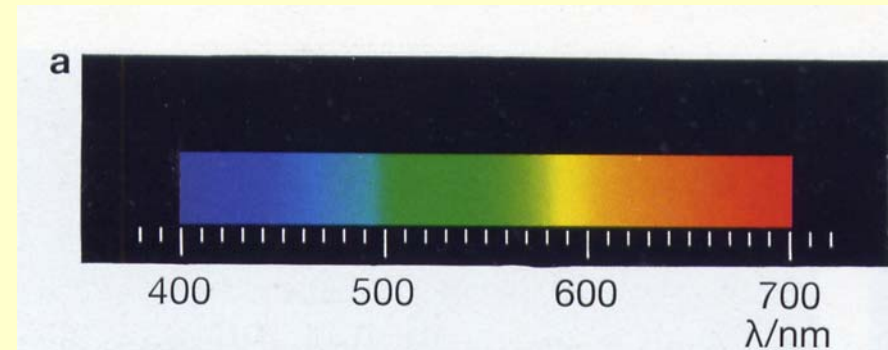
Licht ist elektromagnetische Welle.

**sichtbares** Licht: Wellenlänge

Wellenlänge  $\lambda$  von etwa 0,4 bis 0,7  $\mu\text{m}$

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

Die genauen Buchangaben schwanken!



$$c = f \cdot \lambda$$

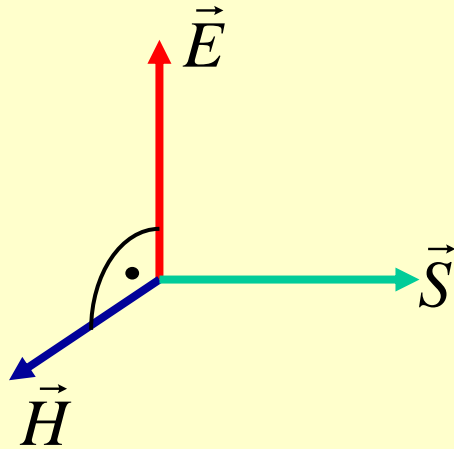
$$= 2.997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

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

Lichtstrahlen breiten sich geradlinig aus!

Wirklich?

# Energetische Größen

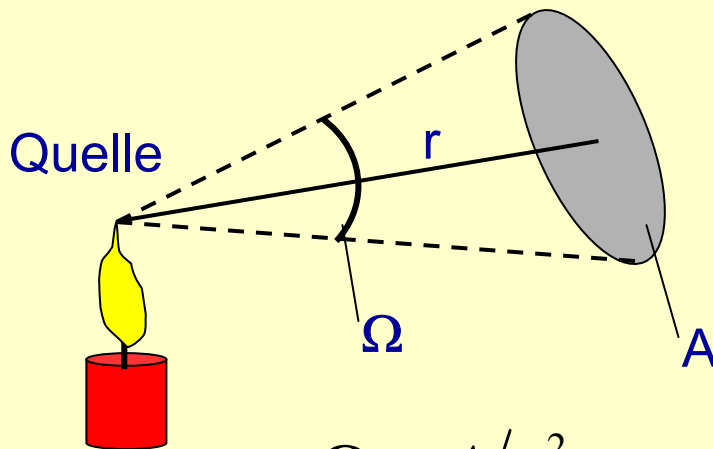


$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Energiestromdichte  
(Poynting-Vektor)

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

$\varepsilon$ : Energiedichte  
in J/m<sup>3</sup>



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

Raumwinkel

**Strahlungsfluß  $\Phi$**  : der pro Sekunde in den Raum abgestrahlte Energiestrom (Watt)

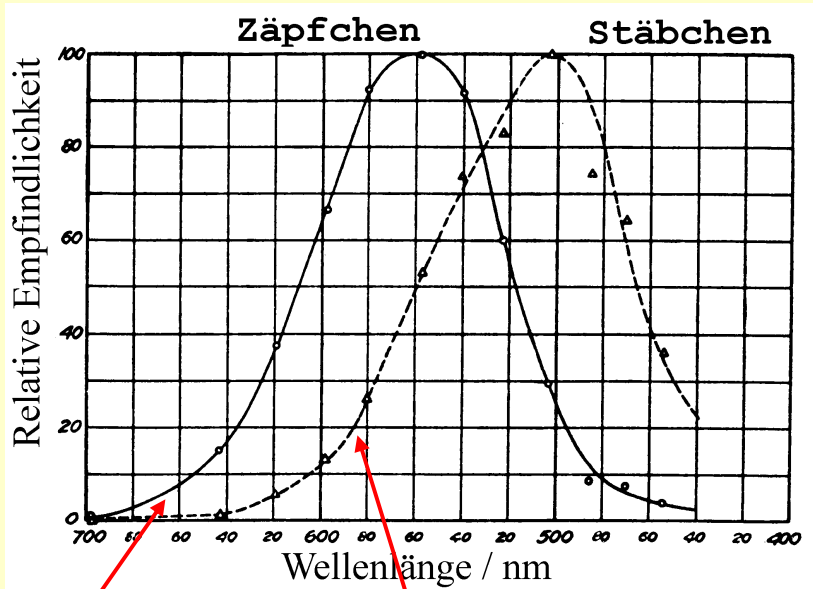
**Strahlstärke  $I = d\Phi/d\Omega$** : Strahlungsfluß pro Raumwinkel (Watt/Steradian)

**Bestrahlungsstärke  $E = \Phi/A_b$** :  
Strahlungsfluß auf bestrahlte Fläche  $A_b$   
(Watt/m<sup>2</sup>)

**Strahldichte  $L=I/A_s$**  : Energiestrom aus strahlender Fläche  $A_s$  (Watt/ (m<sup>2</sup> 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

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

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

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

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

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

Basiseinheit

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

$$(\text{Lux}) \text{ lx} = \text{cd} \cdot \text{sr/m}^2$$

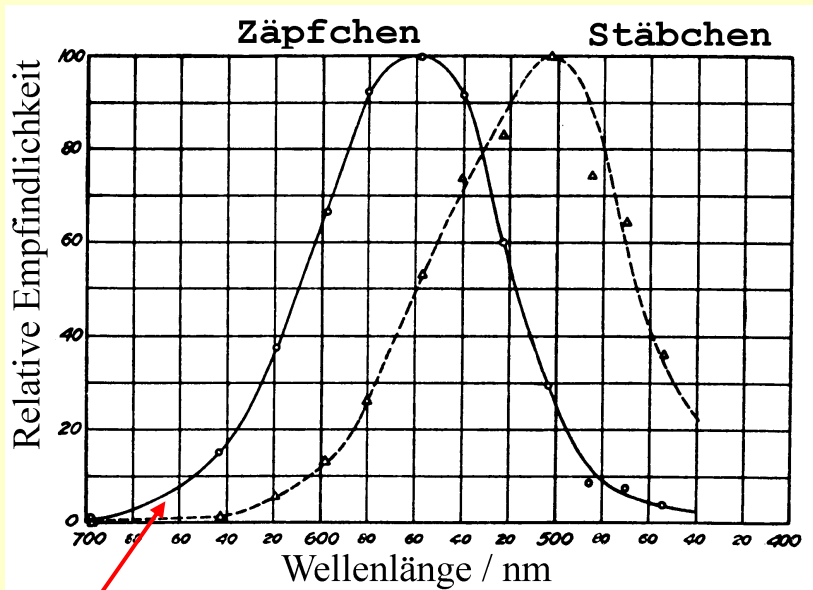
$$\text{Leuchtdichte } L_v = K(\lambda) \cdot L \quad (\text{Stilb}) \text{ sb}$$

$$\text{sb} = \text{cd/m}^2$$



# 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 Leuchtdichte, 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 <sup>2</sup> )		Beleuchtungsstärken (Lux)	
Nachthimmel	~10 <sup>-3</sup>	Sonnenschein	5000 – 70000
Mond	~10 <sup>3</sup>	bedeckter Himmel	900 – 2000
Sonne	~10 <sup>9</sup>	Straßenbeleuchtung	0.5 – 30
Glühlampenkolben	☼ 3·10 <sup>5</sup>	Grobarbeitsplatz	50 – 100
Glühlampenwendel	0.5 - 3.5·10 <sup>5</sup>	Feinarbeitsplatz	300 – 1000
Xe-Höchstdrucklampe	☼ 10 <sup>10</sup>	Feinstarbeitsplatz	1000 – 4000

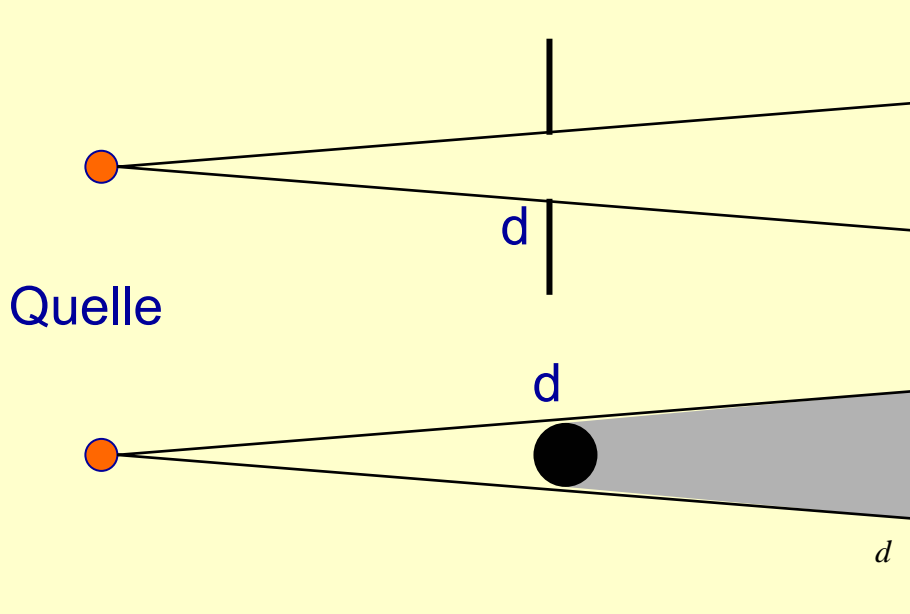
gesamte Leuchtdichte:

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

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.

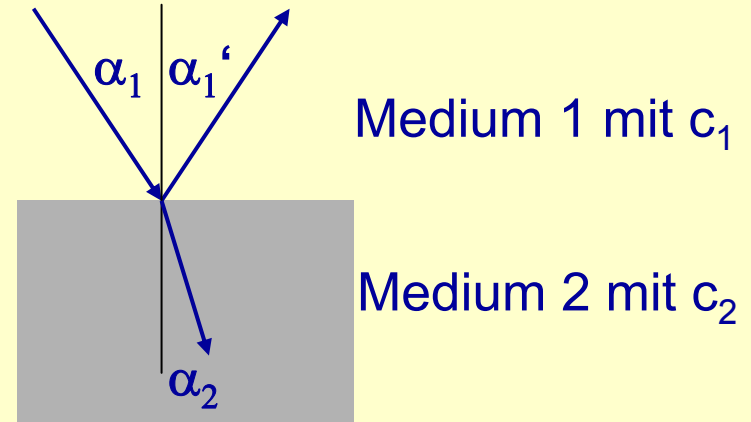
$$t = \sum_i \frac{s_i}{c_i} = \frac{1}{c_0} \sum_i n_i s_i$$

$n$ : 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=  
Vakuumllichtgeschwindigkeit/  
Lichtgeschwindigkeit im Medium

Reflexion

$$\alpha_1 = \alpha_1'$$

Lichtstrahlen bleiben bei  
Reflexion und Brechung  
in einer Ebene.

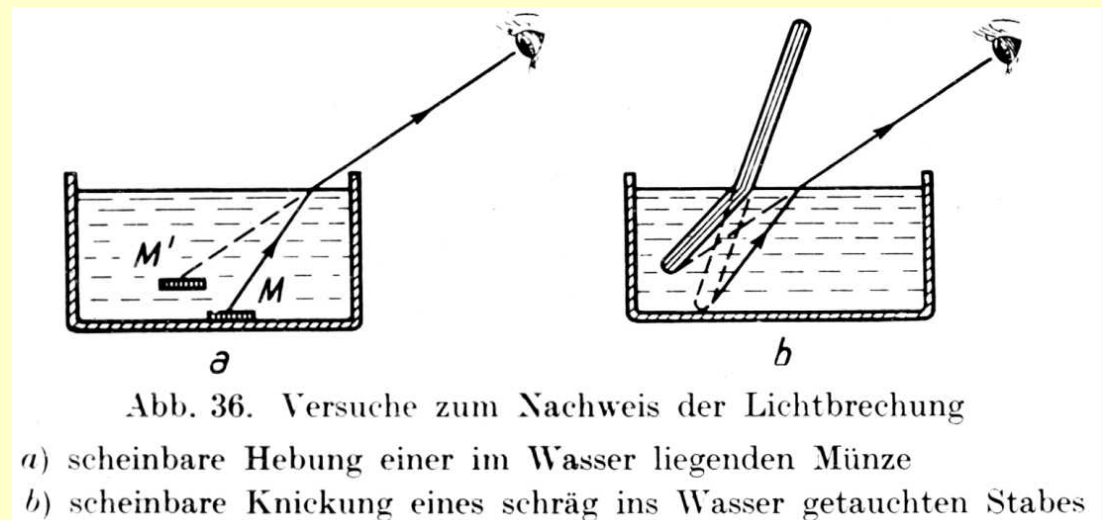


Abb. 36. Versuche zum Nachweis der Lichtbrechung

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

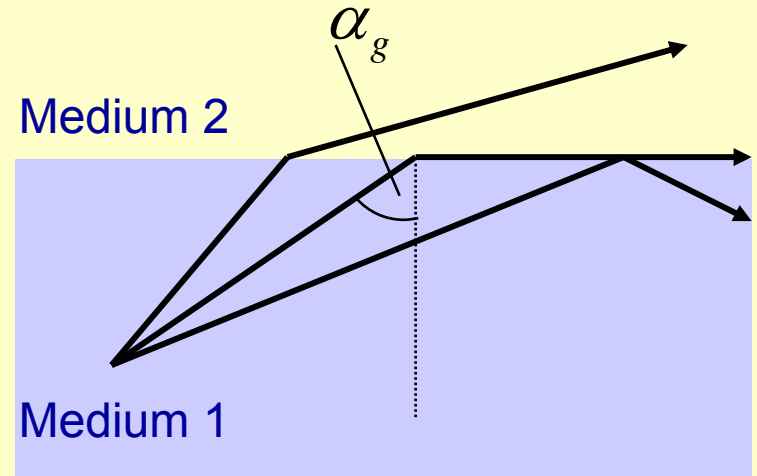
# Totalreflexion

## Totalreflexion

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

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

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

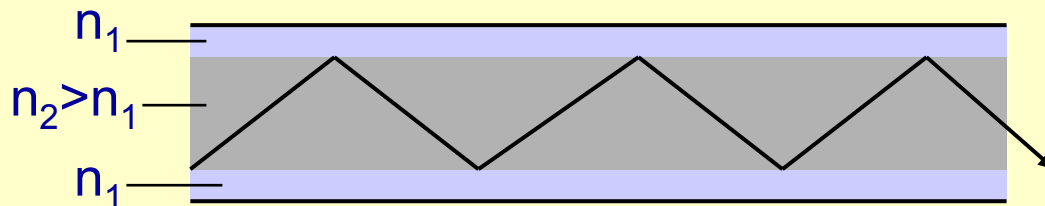


Für  $\alpha_2 = 90^\circ$   $\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1}$  Grenzwinkel der Totalreflexion

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

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

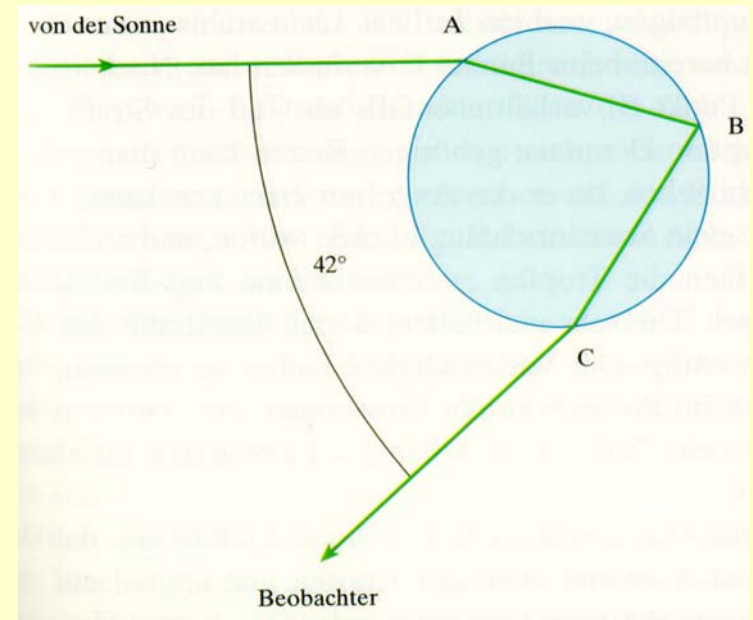
## Lichtleiter



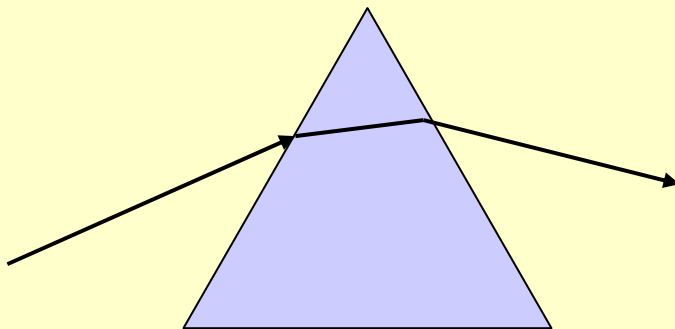
Endoskopie  
Datenübertragung

# Prisma und Regenbogen

## Regenbogen: Reflexion und Brechung am Regentropfen

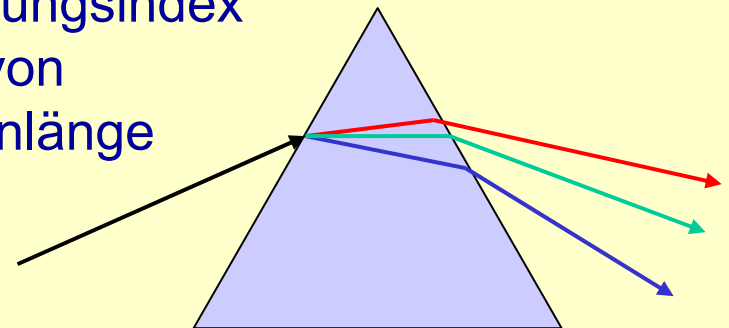


## Brechung



## Dispersion: $n = n(\lambda)$

Brechungsindex  
abh. von  
Wellenlänge



spektrale Zerlegung des Lichtes

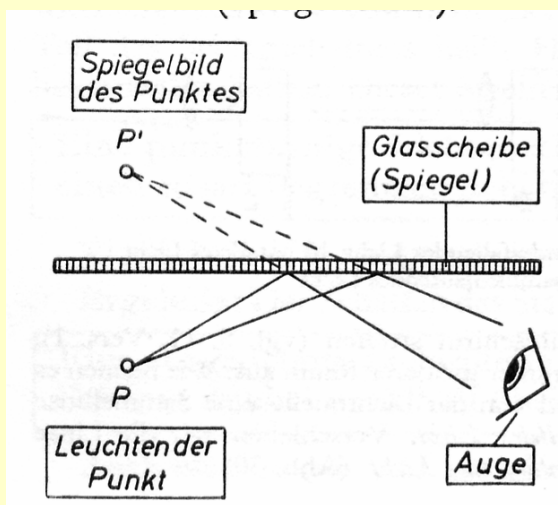
# 27. Juni 2007 - Experimente

---

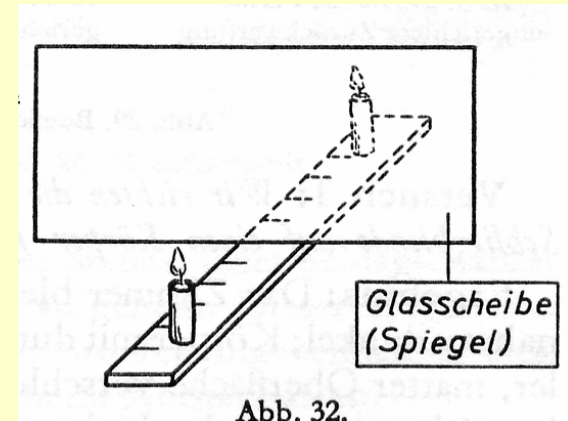
Experimente (Geometrische Optik):

- Schon gemacht: Reflexion und Lichtbrechung
  - Snellius
  - Totalreflexion
- virtuelles Bild einer Kerze bei Reflexion an einer Glasscheibe
- 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

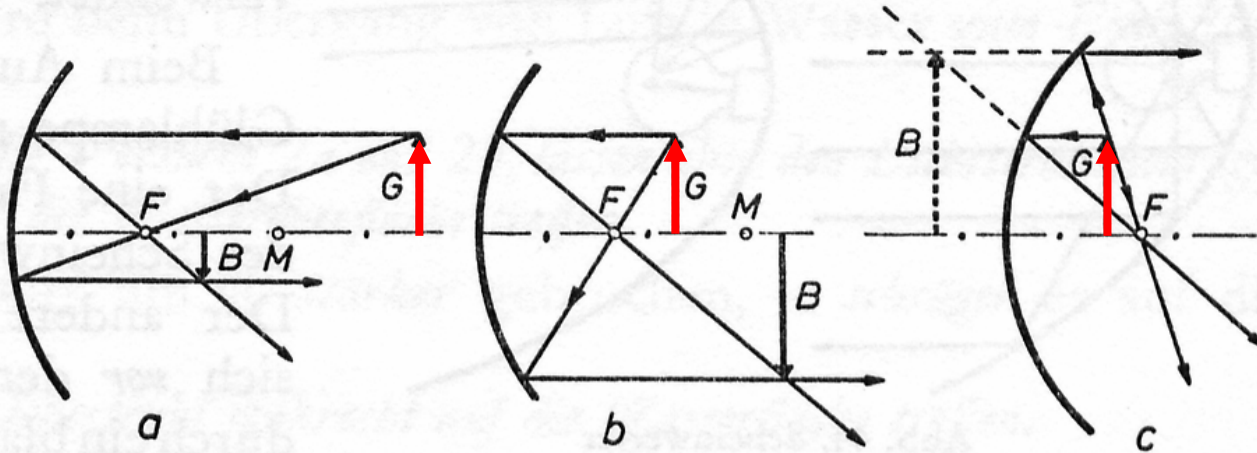
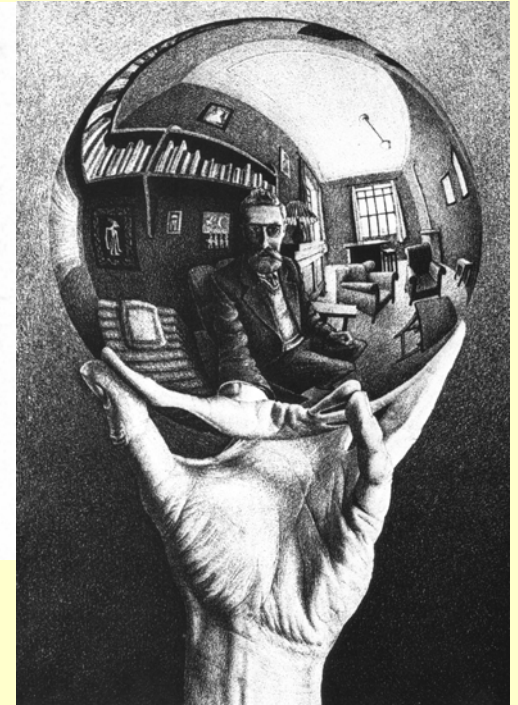


Abb. 42. a—c Bilder am Hohlspiegel



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)

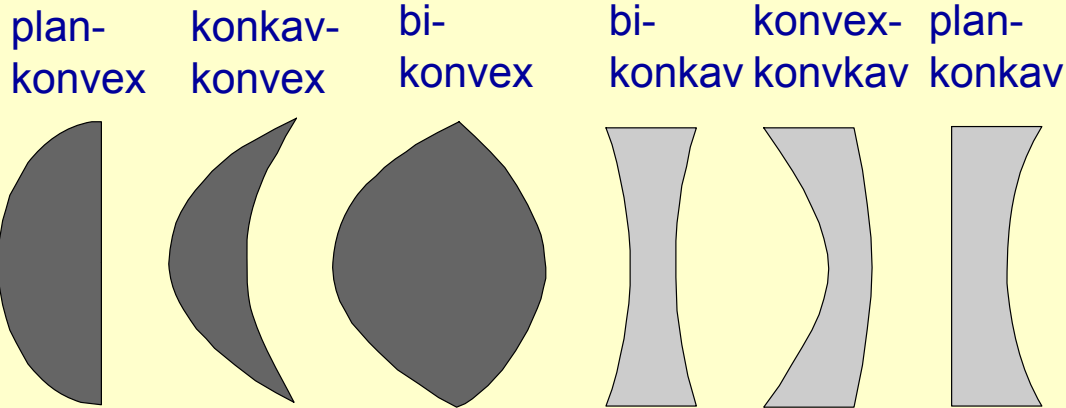
Abb. a und b: reelle Bilder (mit  $B < G$  bzw.  $B > G$ )

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



Zahnarzt-Hohlspiegel

# Übersicht Linsen



**Abbildungsmaßstab:**

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

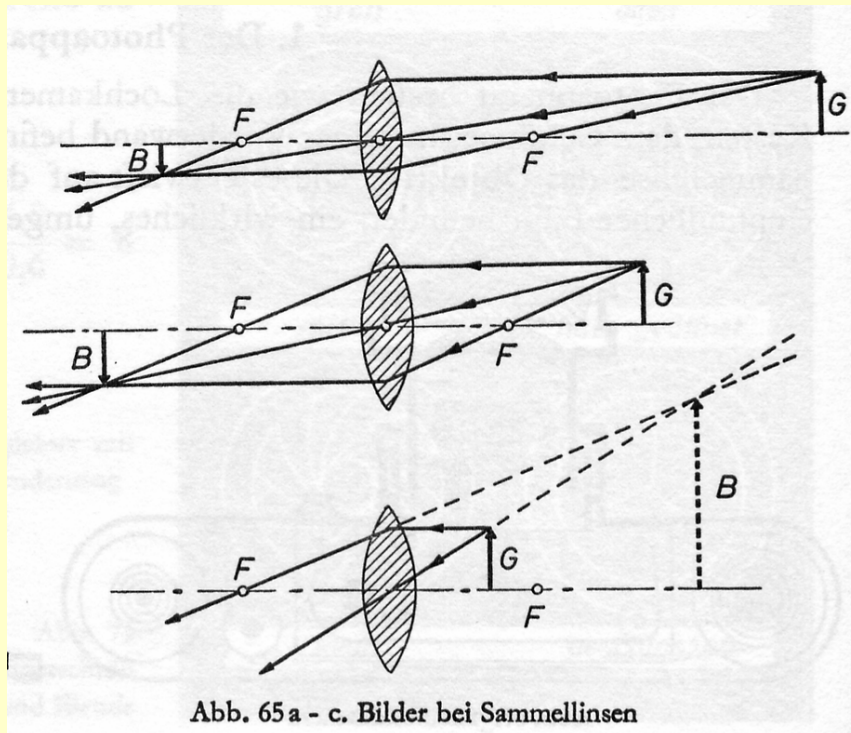
**Linsengleichung:**

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

$g$  : Gegenstandsweite  
 $b$  : Bildweite  
 $f$  : Brennweite

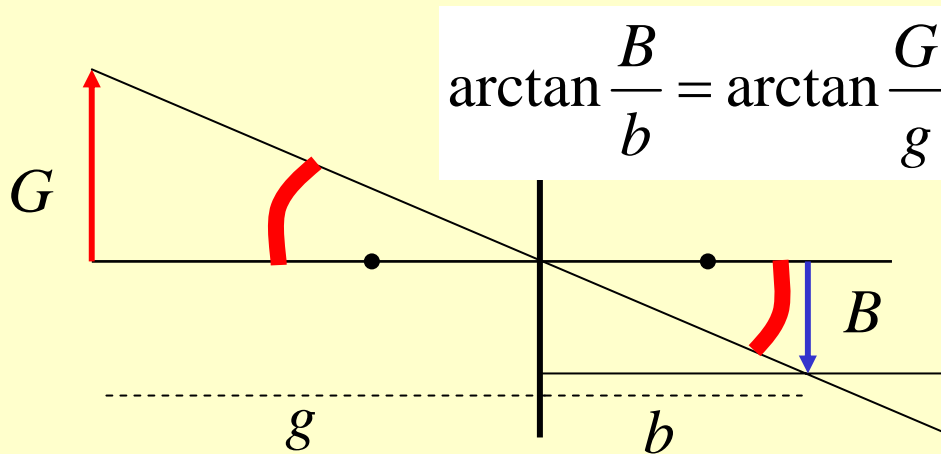
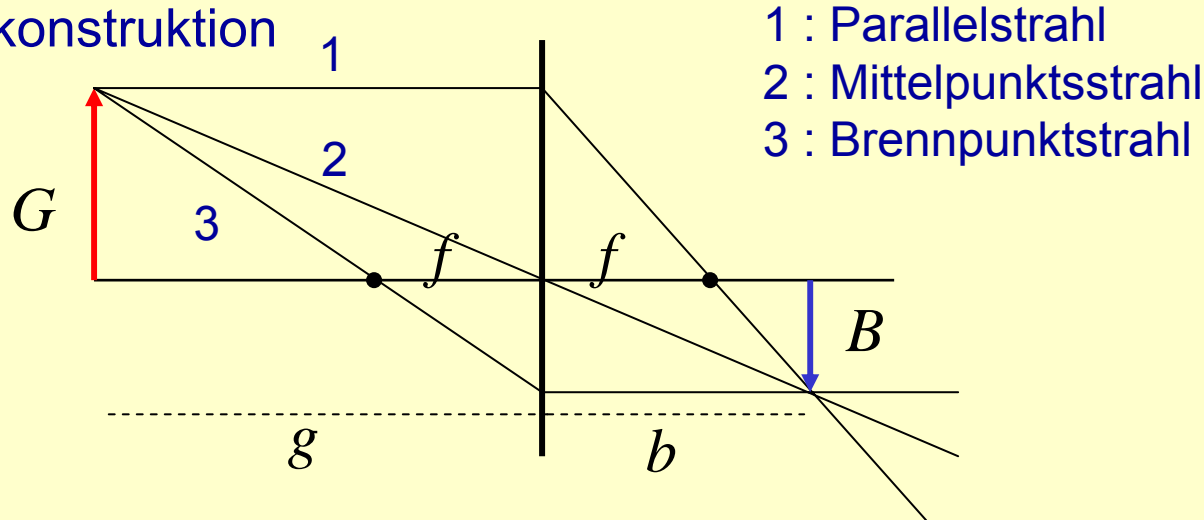
Die Vereinfachung kann nicht immer so angewendet werden, vgl. Auge, dort:

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



# Sammellinse 1

Bildkonstruktion



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

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

bzw.

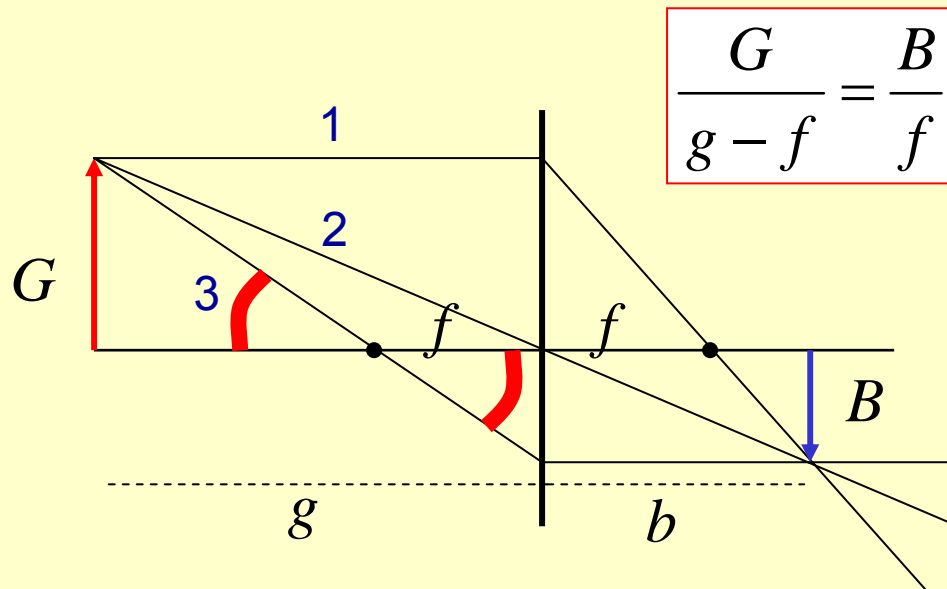
$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

Also Abbildungsmaßstab

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

# Sammellinse 2

## Bildkonstruktion



$$\frac{G}{g-f} = \frac{B}{f}$$

setze Abbildungsmaßstab

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

ein:

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

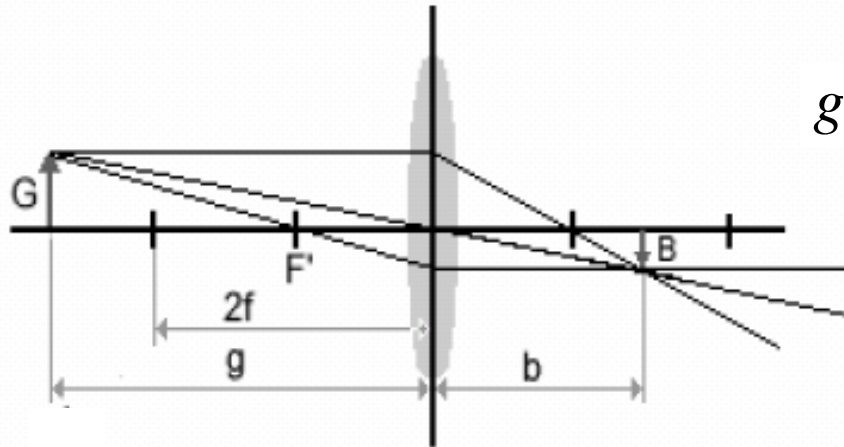
$$g-f = \frac{g}{b} f$$

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

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

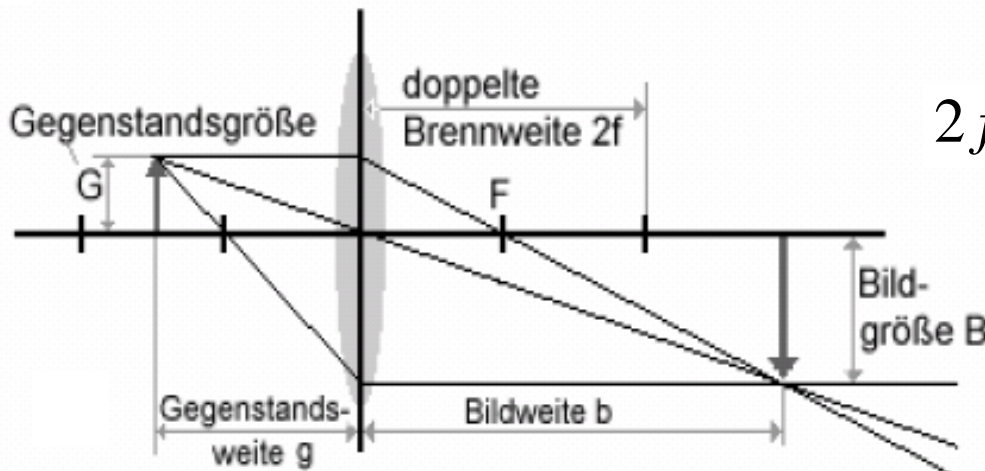
- 1 : Parallelstrahl
- 2 : Mittelpunktstrahl
- 3 : Brennpunktstrahl

# Sammellinse 3



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

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



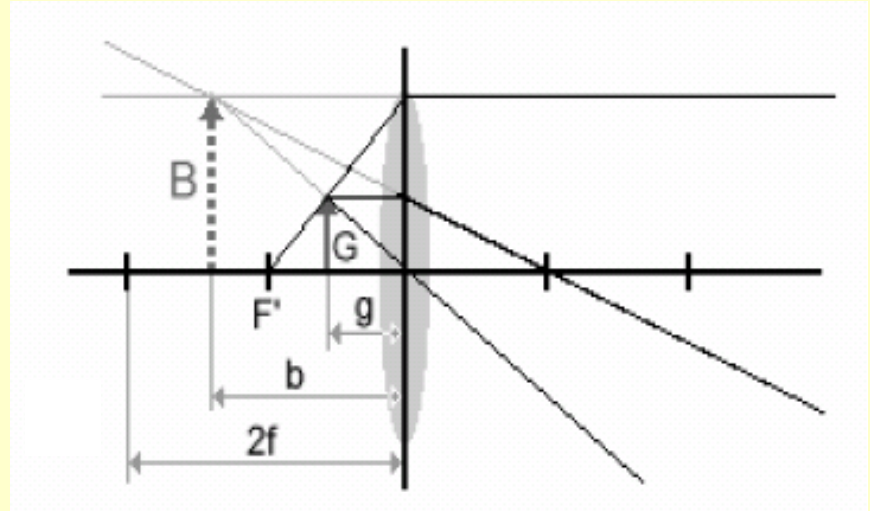
$$2f > g > f \Rightarrow B > G$$

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

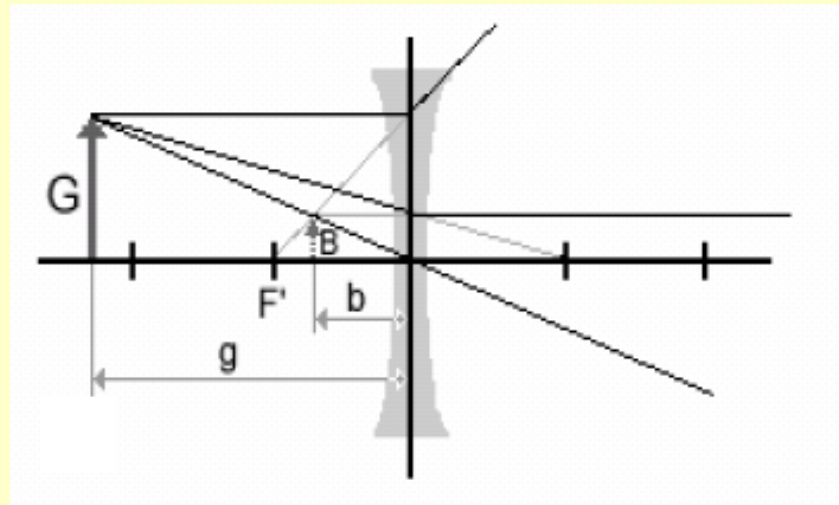
# Virtuelle Abbildungen

bei Sammellinsen:

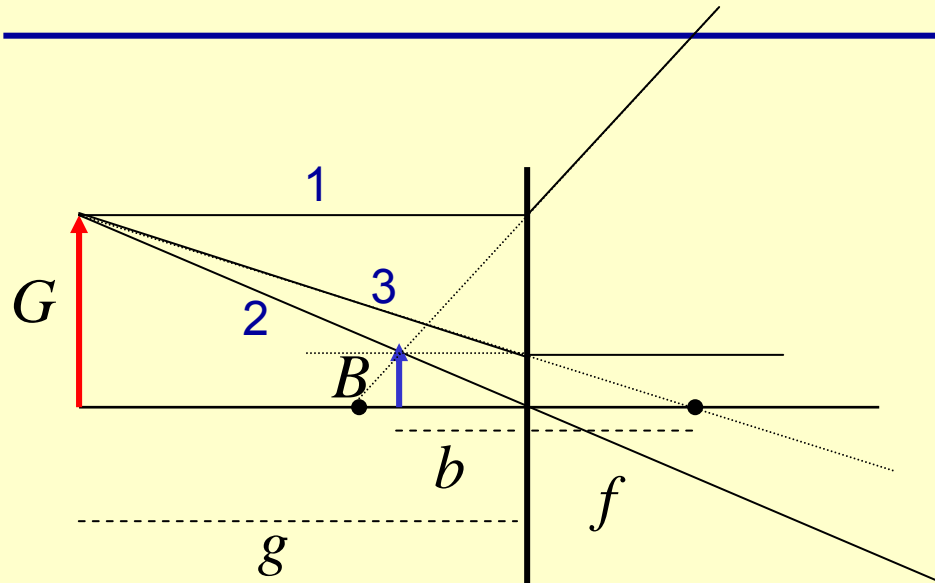
$$g \leq f$$



bei Zerstreuungslinsen:



# Zerstreuungslinse



**negative Brennweite!**

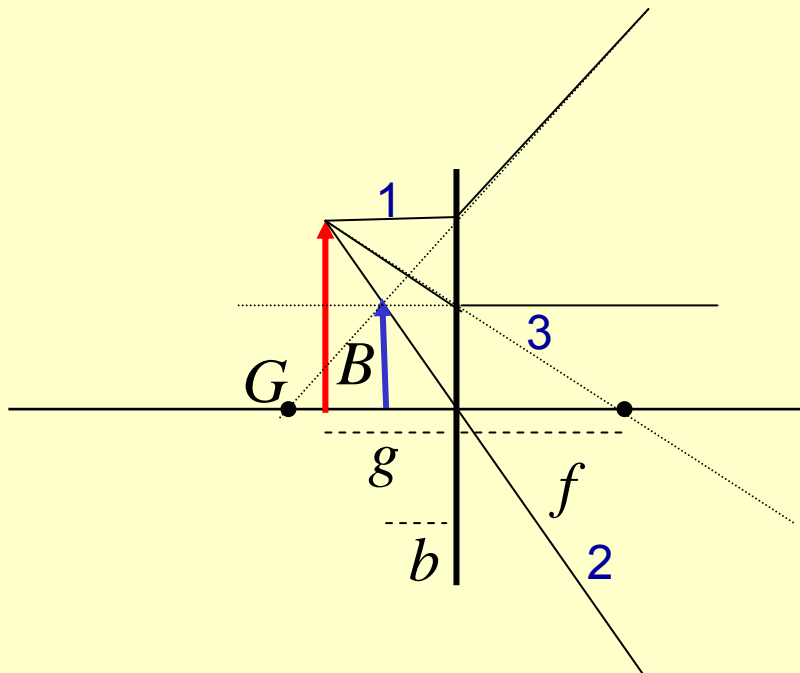
- 1 : Parallelstrahl
- 2 : Mittelpunktstrahl
- 3 : Brennpunktstrahl

**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.  $D_2 = -D_1$

$$f = f_1 f_2 / d \quad \text{bzw.} \quad D = d D_1 D_2$$

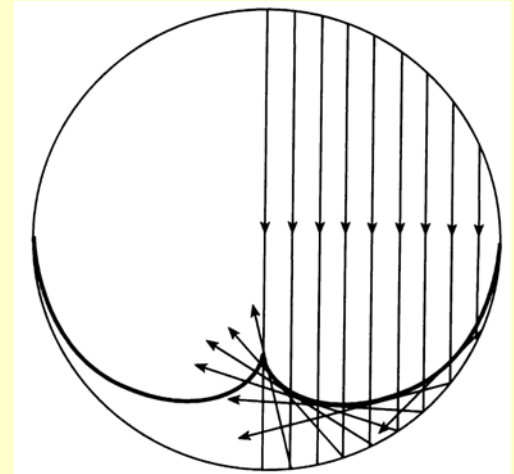
Immer positiv!  
(Wird auch in der  
„Ionenoptik“ verwendet)

Weitere Linsenkombinationen bei  
optischen Instrumenten (Mikroskop, Fernrohr)

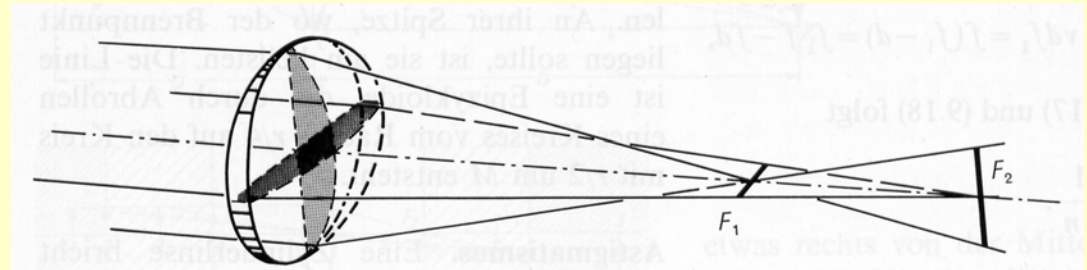


# Abbildungsfehler

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

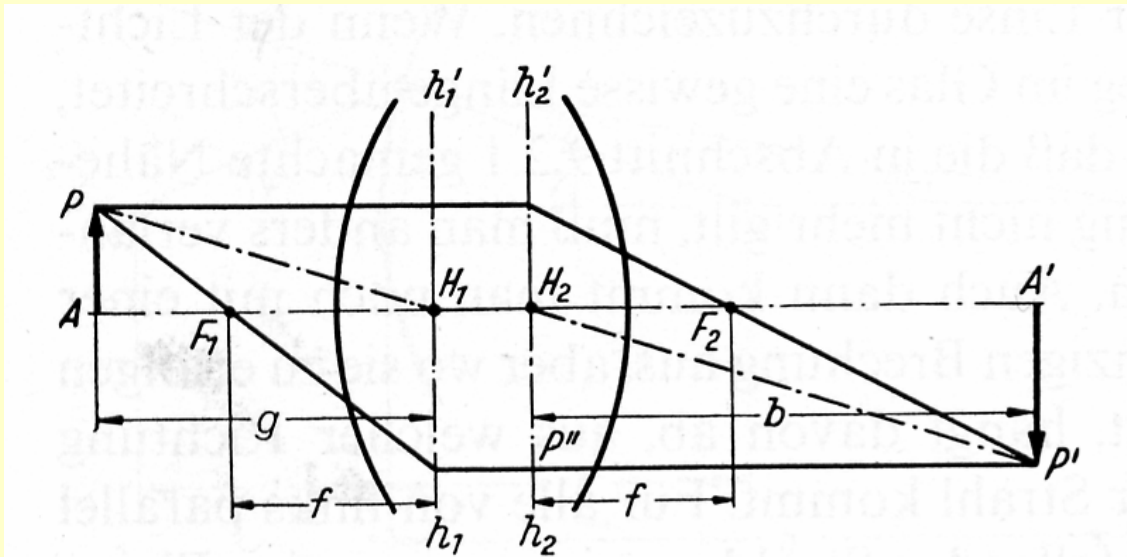


**Astigmatismus:** In zwei senkrechten Ebenen verschiedene Krümmungsradien und damit verschiedene Brennweiten (Extremfall: Zylinderlinse). Astigmatismus auch bei schrägem Einfall auf sphärische Linse.



**Chromatische Aberation:** Dispersion verursacht verschiedene 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 Kardinal-elemente

2 Hauptebenen  
2 Knotenebenen  
2 Brennebenen

# Brennweitenbestimmung mittels Besselmethode

Linse Gleichung 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

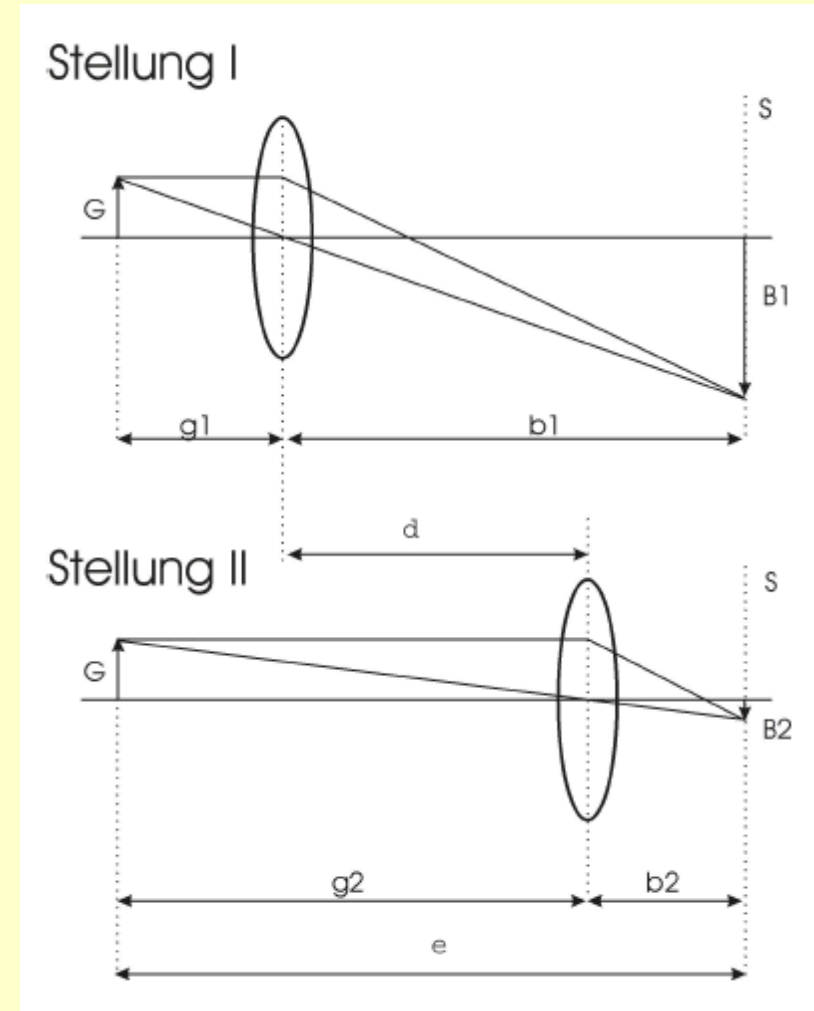
$$b = (e + d) / 2$$

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

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

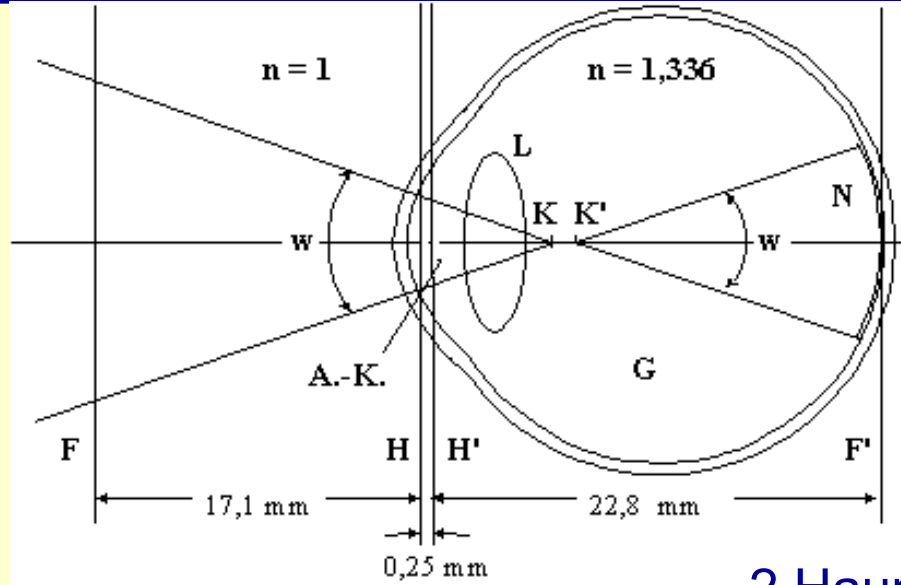
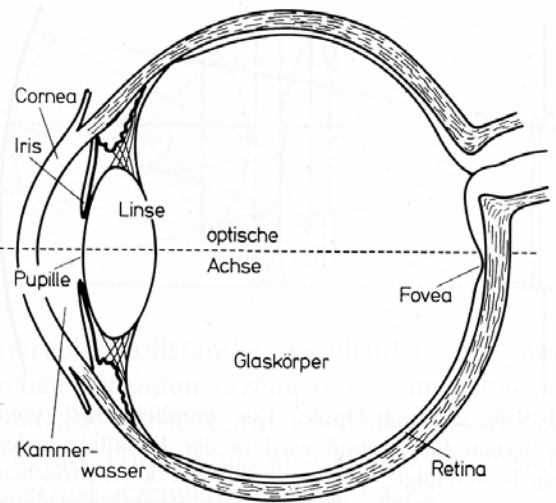
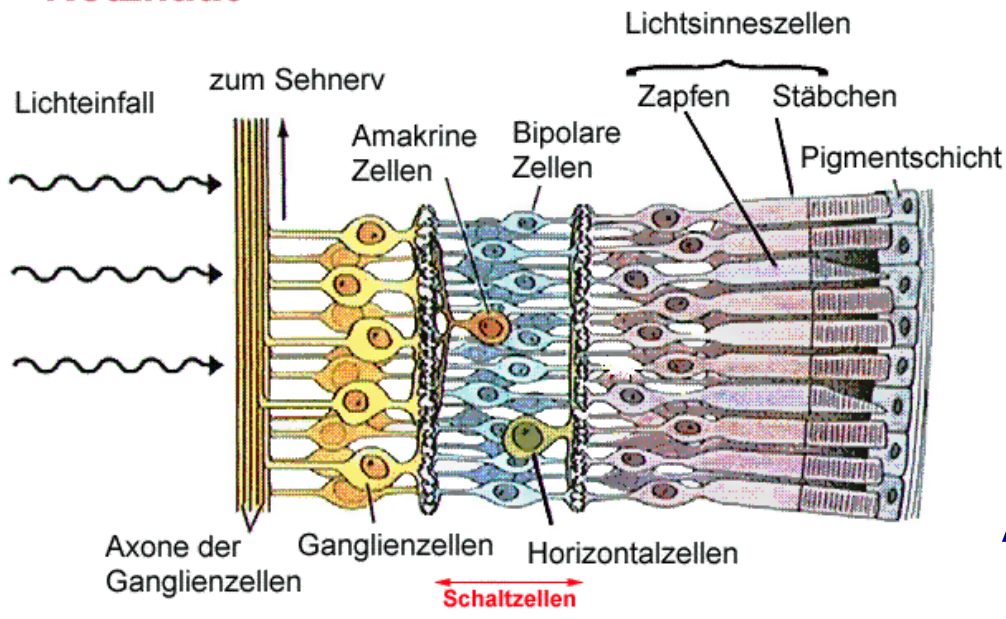


Abb. 9.51. Schnitt durch das menschliche Auge. (Nach H.-U. Harten)

## Netzhaut

Richtung der Informationsübertragung



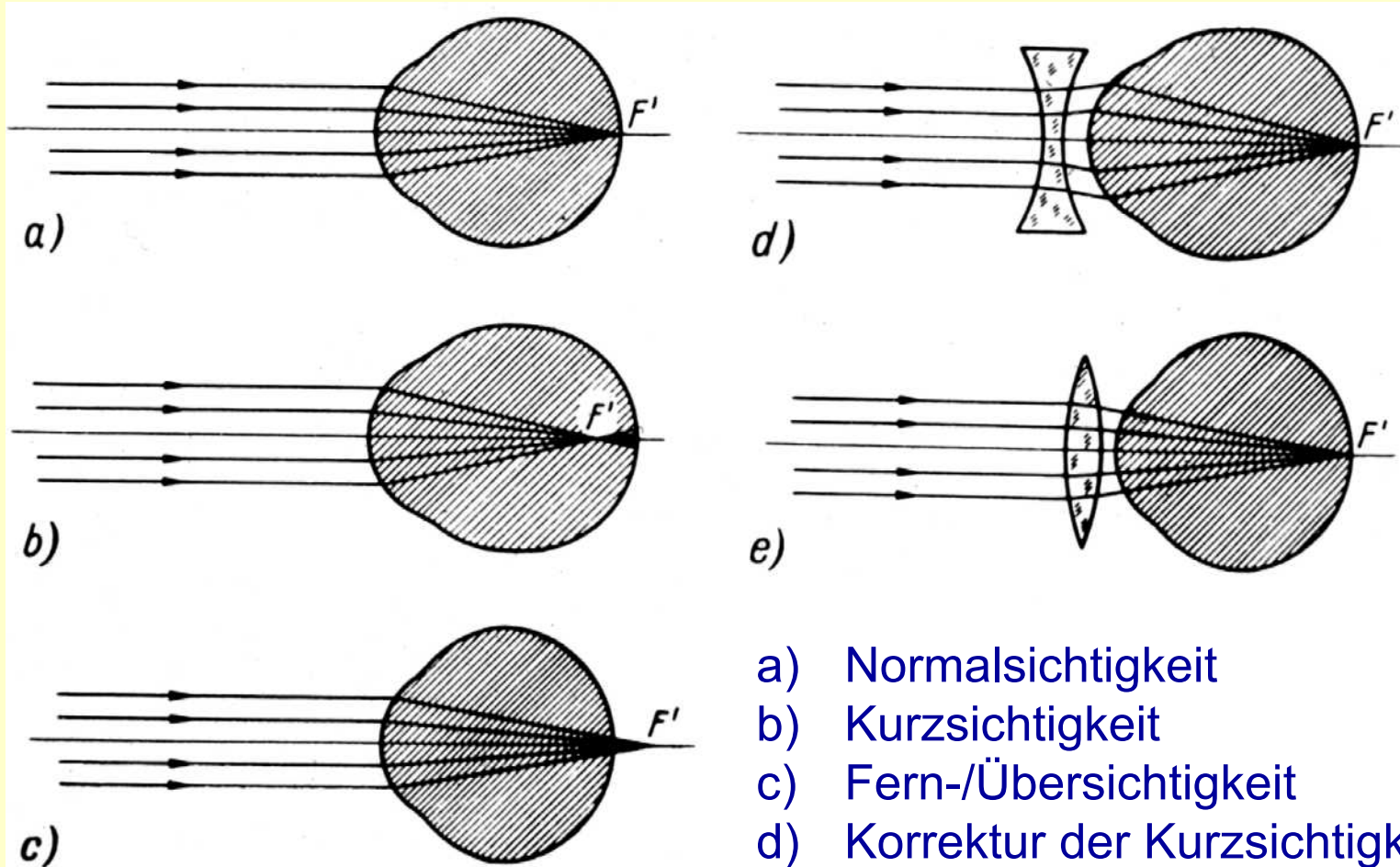
- 2 Hauptebenen
- 2 Knotenebenen
- 2 Brennebenen

**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

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

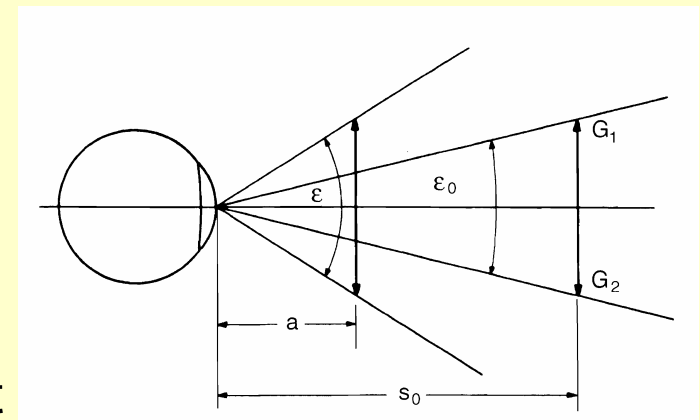
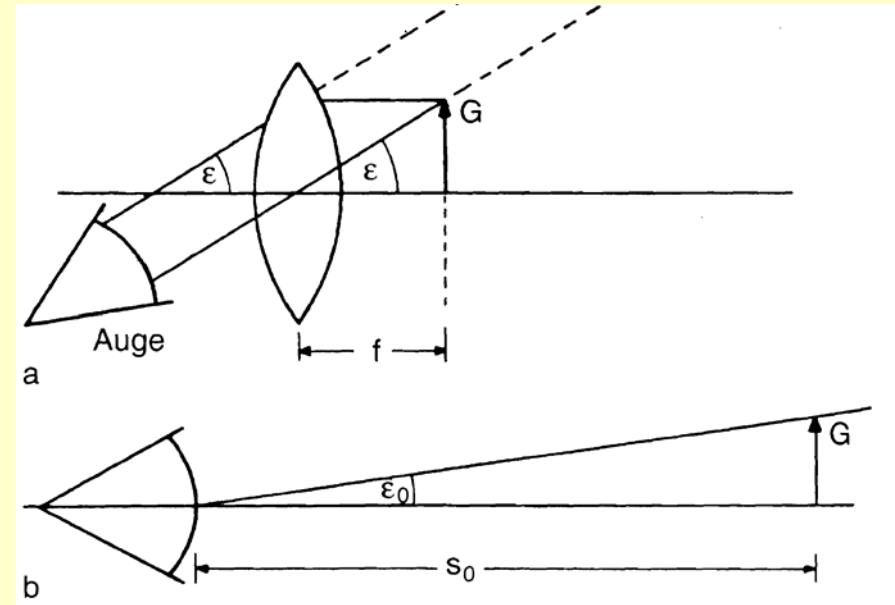
Gegenstandsweite = Brennweite (d.h. Bild im Unendlichen)

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

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

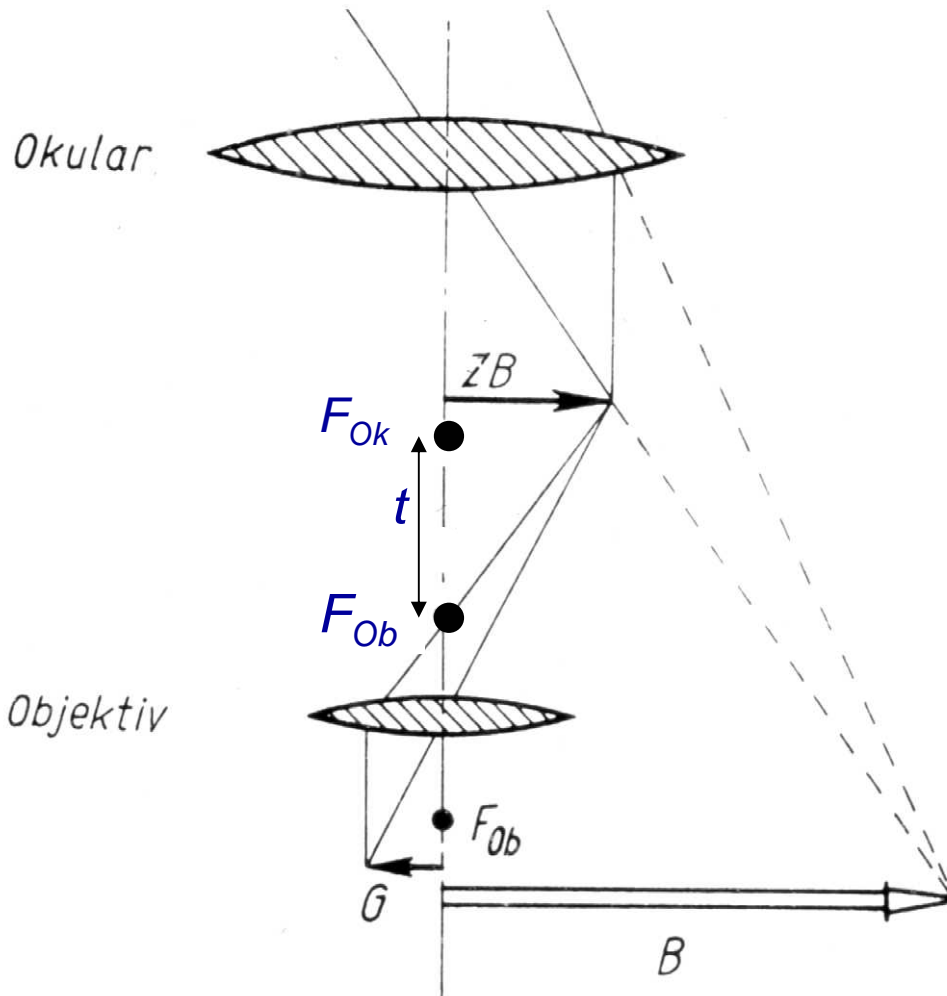
Damit gilt für die Lupenvergrößerung  $V = s_0 / f$

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:**

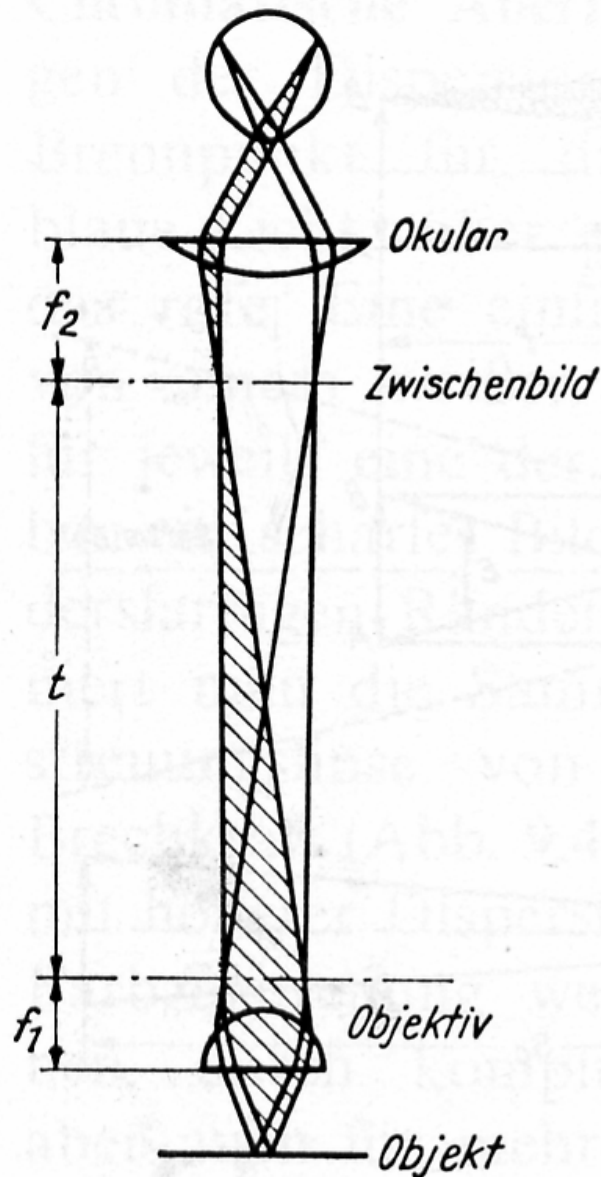
$$V_{ges} = V_{Ob} \cdot V_{Ok} \approx \frac{t}{f_1} \frac{s_0}{f_2}$$

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  
 $\Delta s$  für selbstleuchtende  
Objekte (Helmholtz)

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

bzw. nicht-selbstleuchtende  
Objekte (Abbé)

$\lambda$  : Wellenlänge des Lichtes

$n$  : Brechungsindex des Mediums zw.  
Objekt (Deckgläschen) und  
Objektiv (Luft oder Immersionsöl)

$\alpha$ : 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**

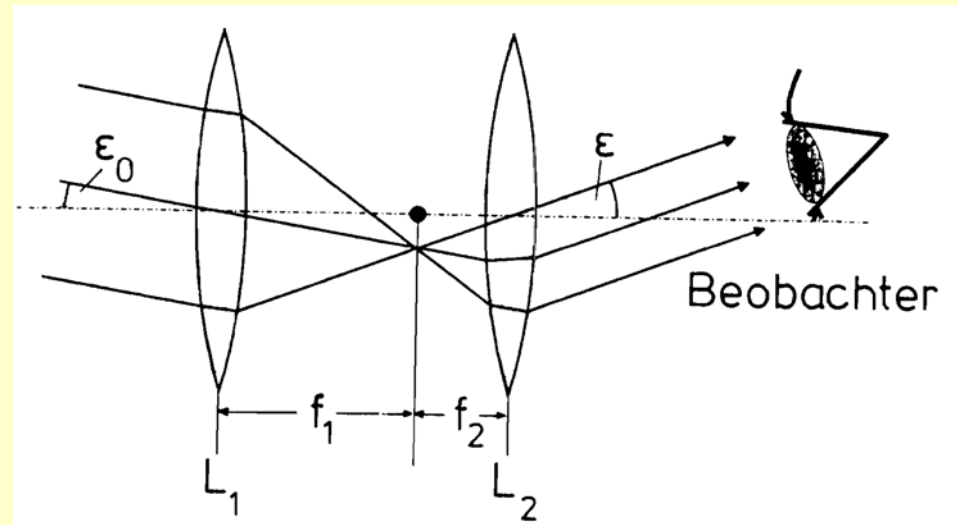
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m v}$$



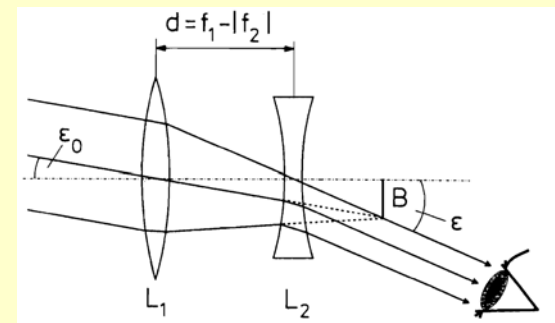
# Fernrohre

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  $\alpha$  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.

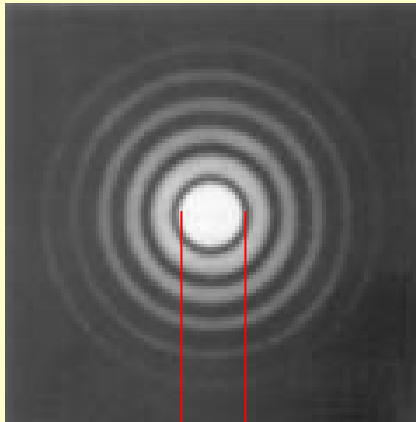
# 04. Juli 2007 - Experimente

---

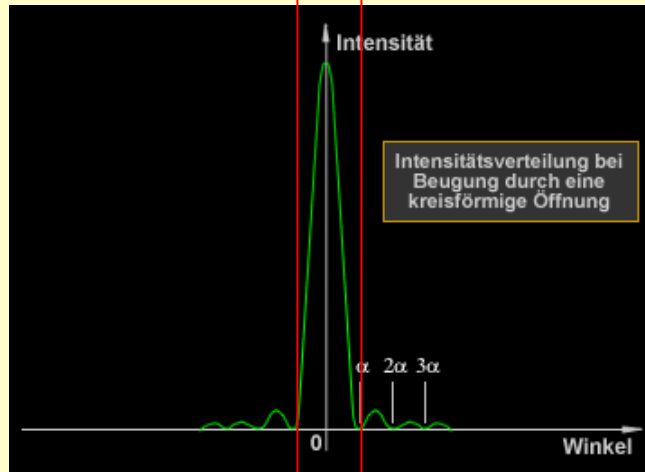
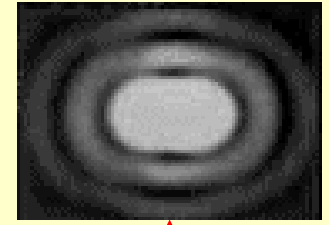
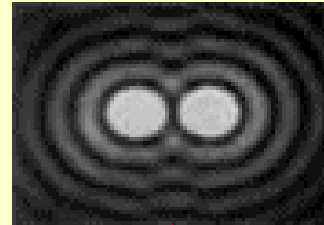
## Experimente (Wellenoptik):

- 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

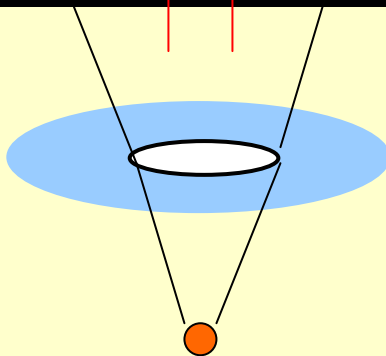


$\alpha > \alpha_C$  : 2 getrennte Objekte

$\alpha < \alpha_C$  : 2 nichtgetrennte Objekte

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

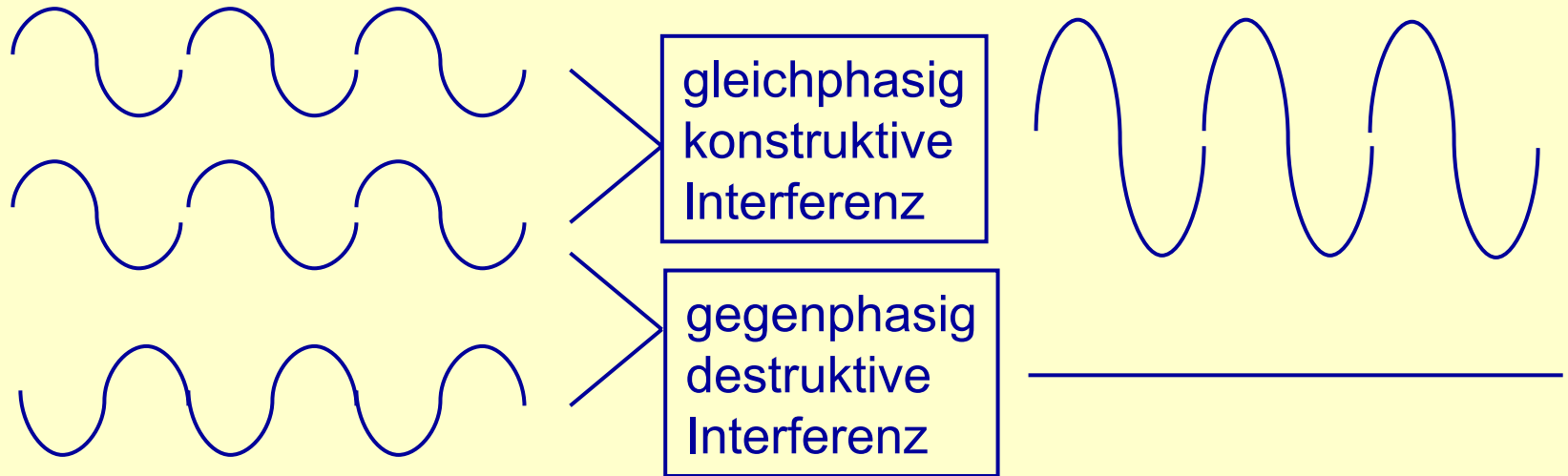
Rayleigh-Kriterium



Lochblende:  
Durchmesser d

leuchtendes Objekt

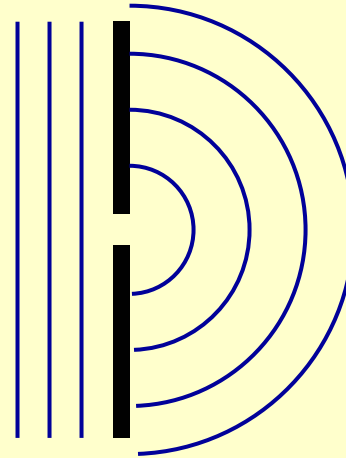
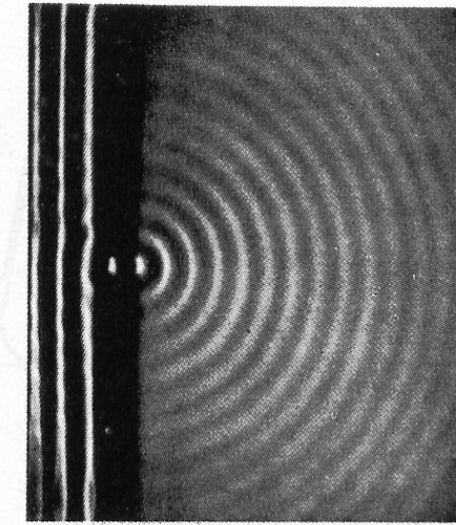
## kohärente (phasenstarre) Überlagerung



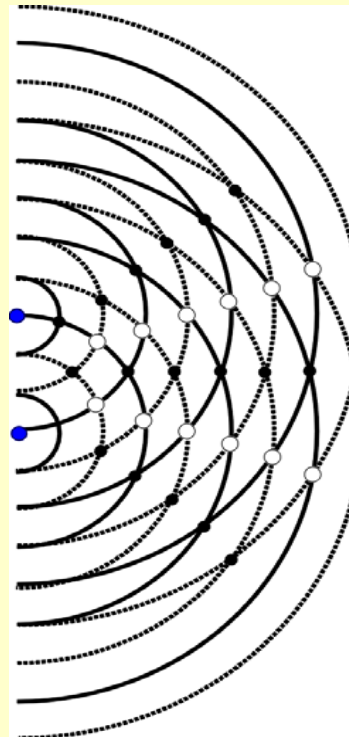
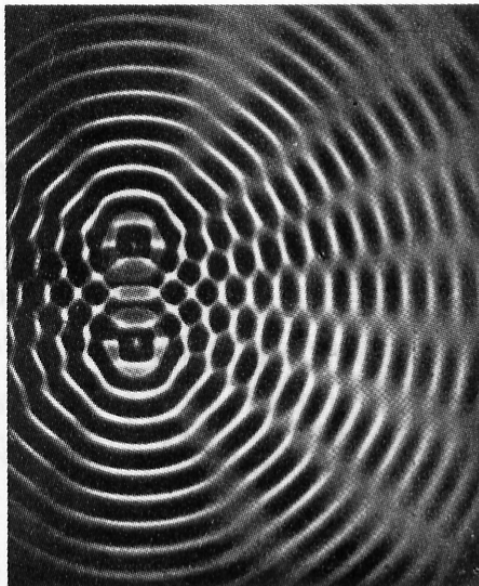
### Huygenssches Prinzip:

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:

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

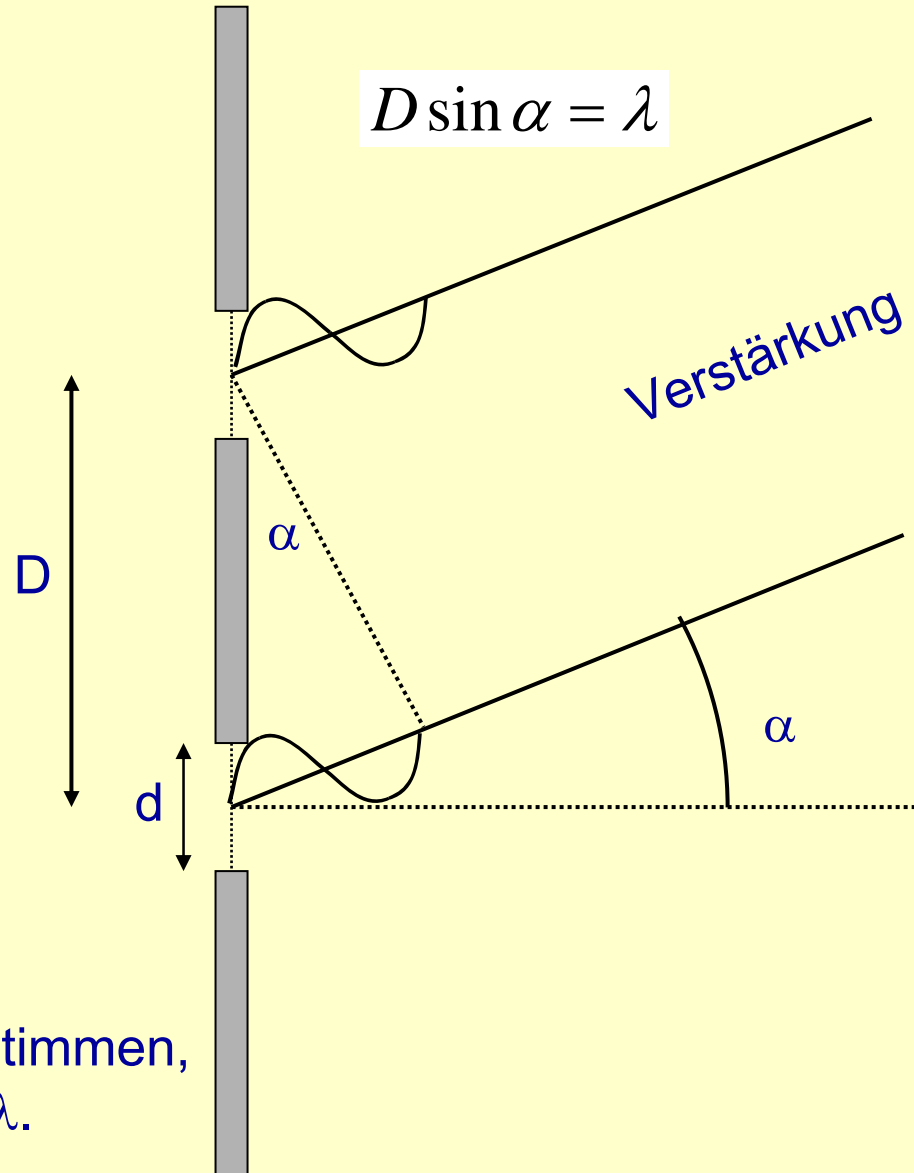
Beugungsminima:

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

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

$D$  : Spaltabstand

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



Bei bekanntem  $\lambda$  läßt sich  $D$  bestimmen,  
bei bekanntem  $D$  entsprechend  $\lambda$ .

# Beugung am Gitter

Beugungsmaxima:

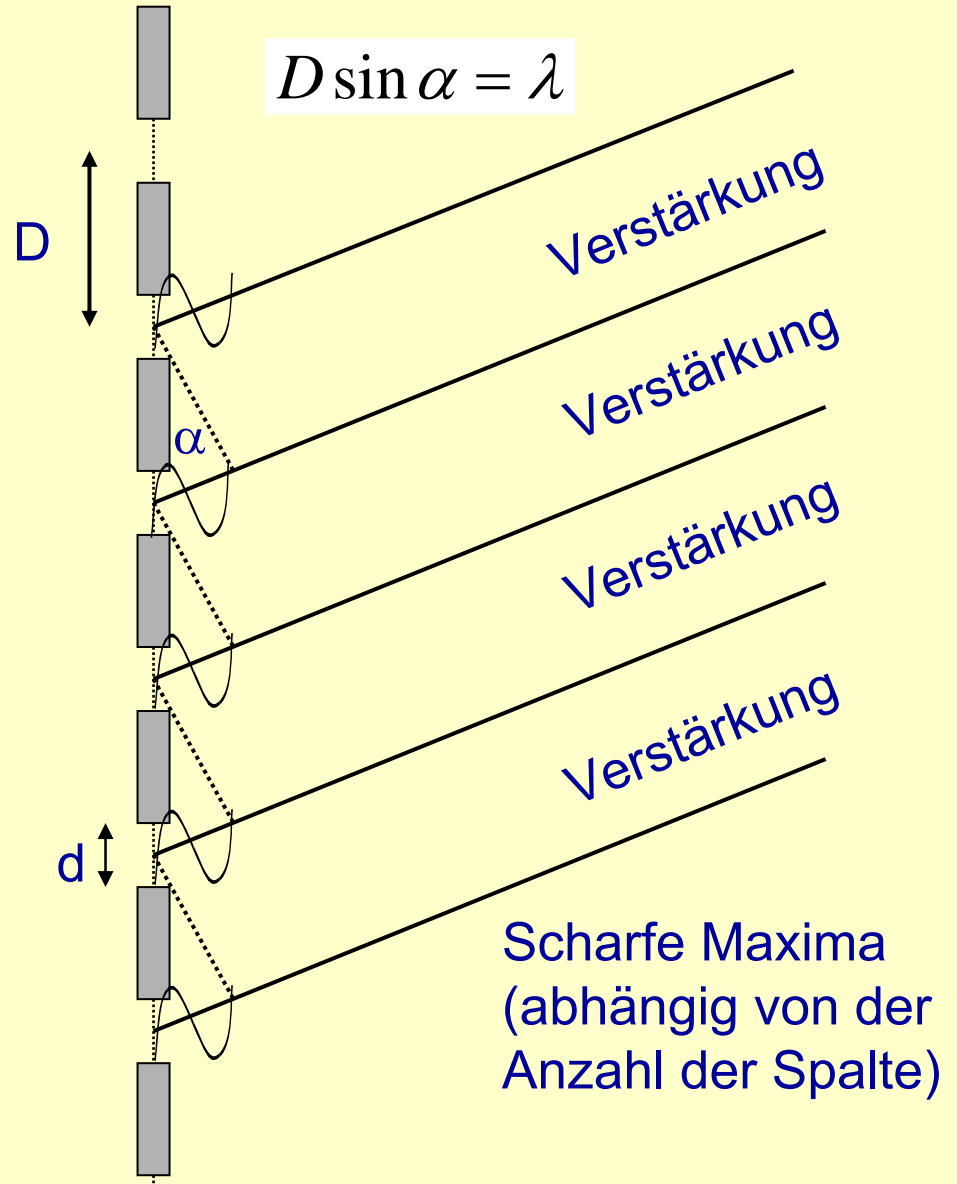
$$D \sin \alpha = n \lambda$$

Beugungsminima:

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

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

$D$  : Spaltabstand

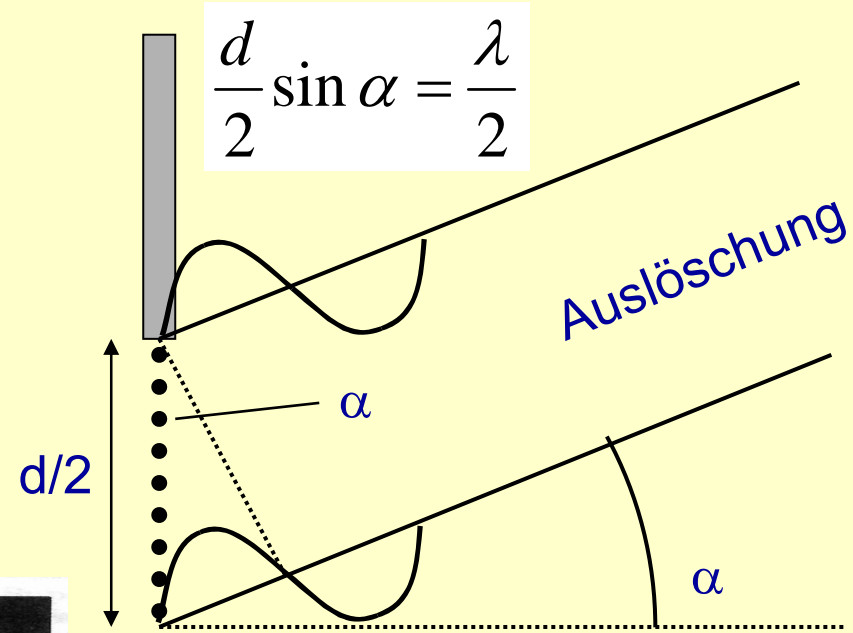
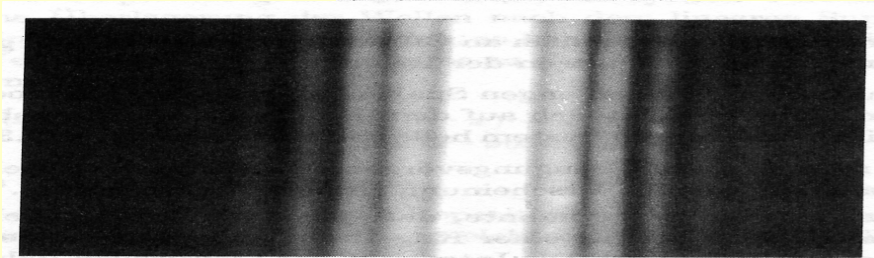
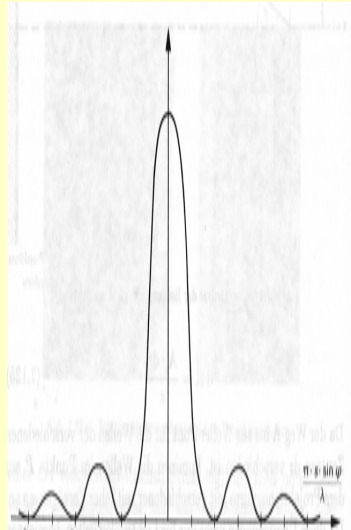


# Beugung am Einzelspalt

$$d \approx \lambda$$

Beugungsbild und Intensitätsverteilung

Mathematisch:  
Fourier-Analyse  
der Öffnung bzw.  
Blende



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

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.

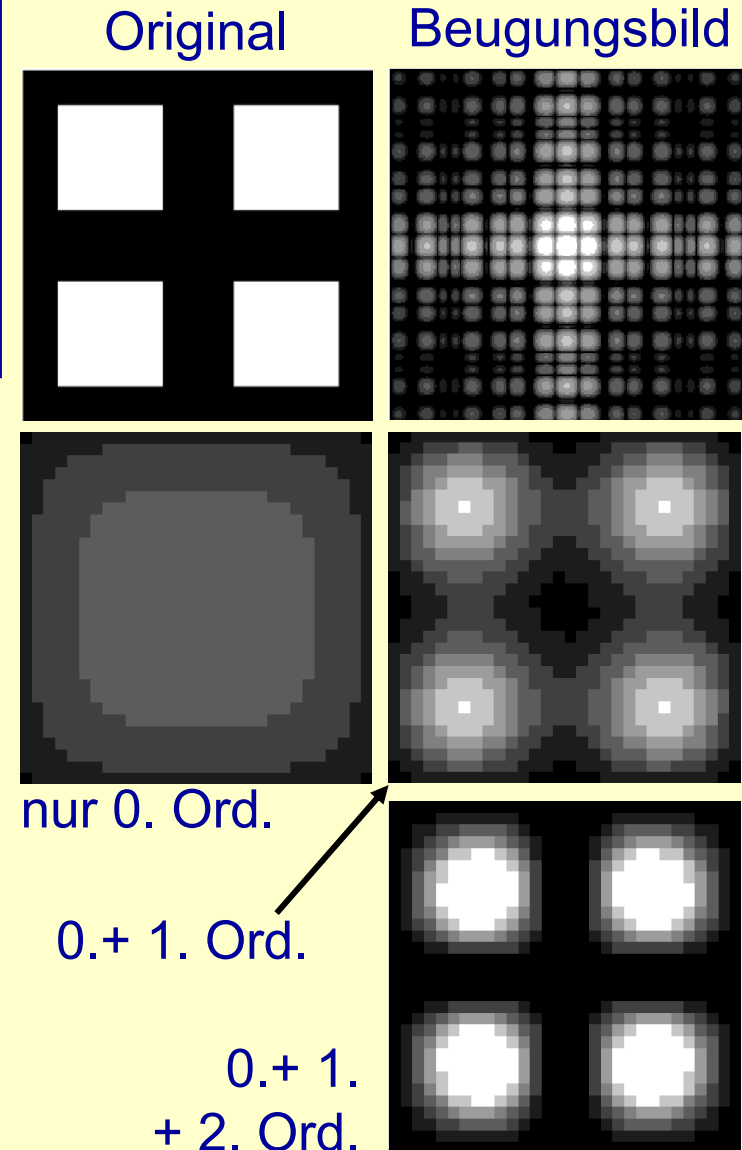
Auflösung bei:

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

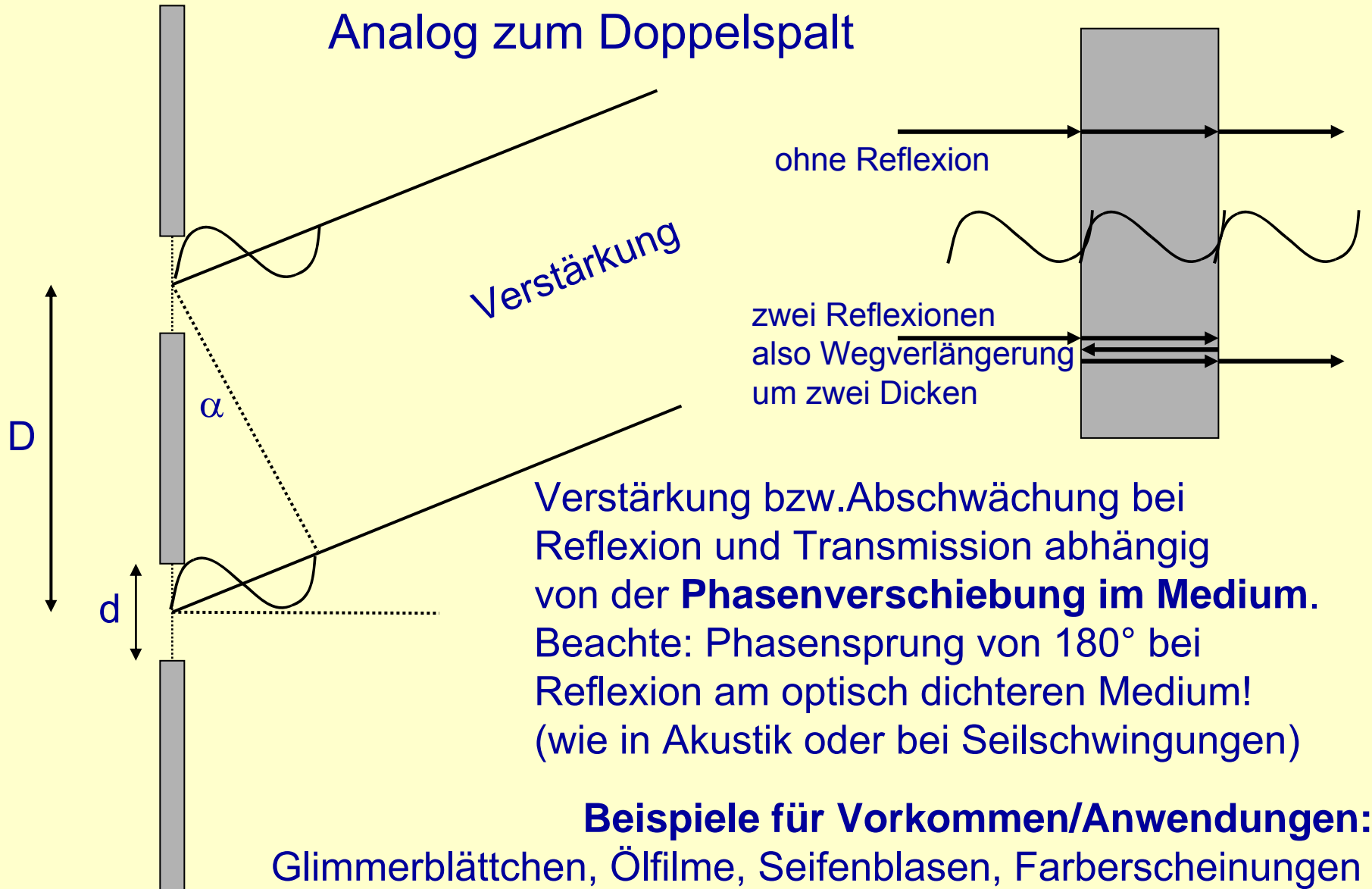
Immersionsmikroskopie  $\Delta s = 200 \text{ nm}$

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

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



# Interferenzen an dünnen Schichten



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

# Polarisation

Licht ist **Transversalwelle**

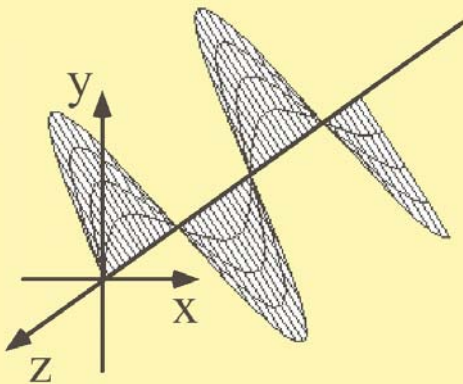
Schwingungsrichtung von E-Feldvektor und H-Feldvektor sind **senkrecht** zur Ausbreitungsrichtung

Polarisationsrichtung: Schwingungsrichtung des E-Feldvektors.

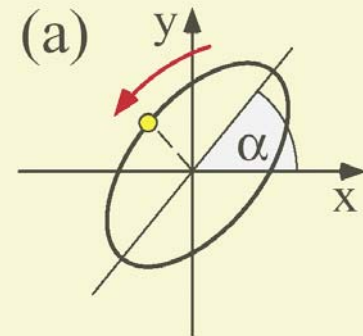
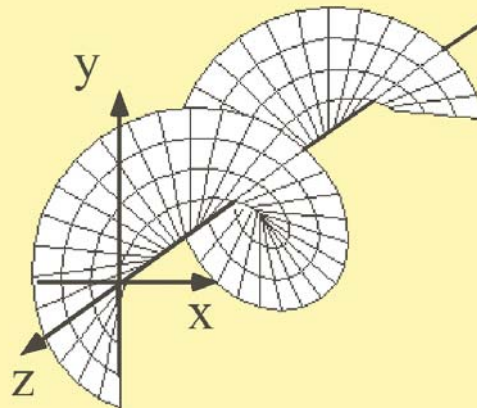
Polarisation

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

Linear polarisierte Welle



Zirkular polarisierte Welle



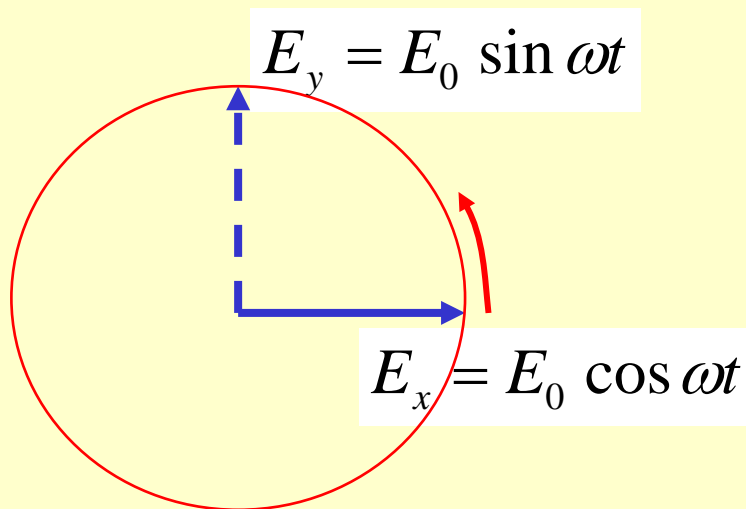
Elliptisch polarisiertes Licht

# Zirkulare Polarisation

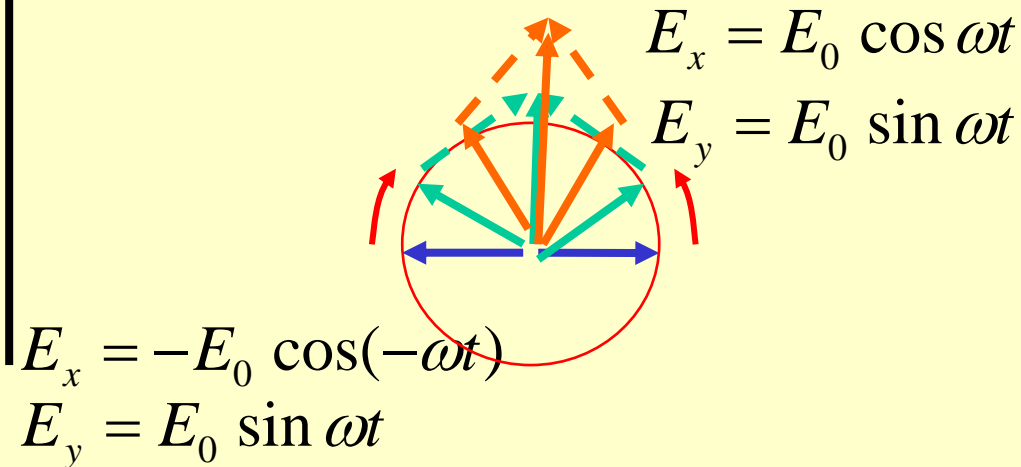
## Zirkular und linear polarisierte Lichtstrahlen

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:



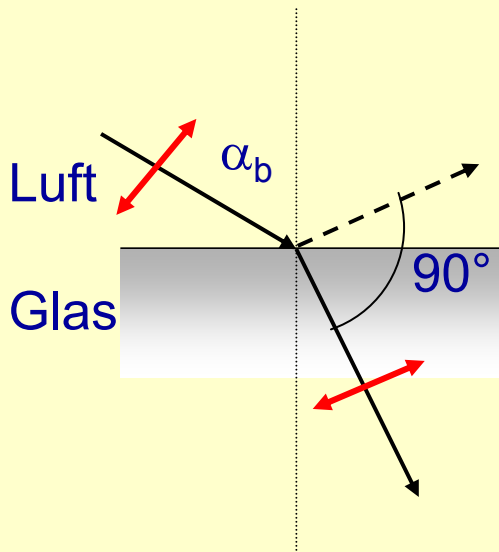
„Doppelbrechung“: Strahlen unterschiedlicher Polarisationsrichtungen haben unterschiedliche Geschwindigkeiten.

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

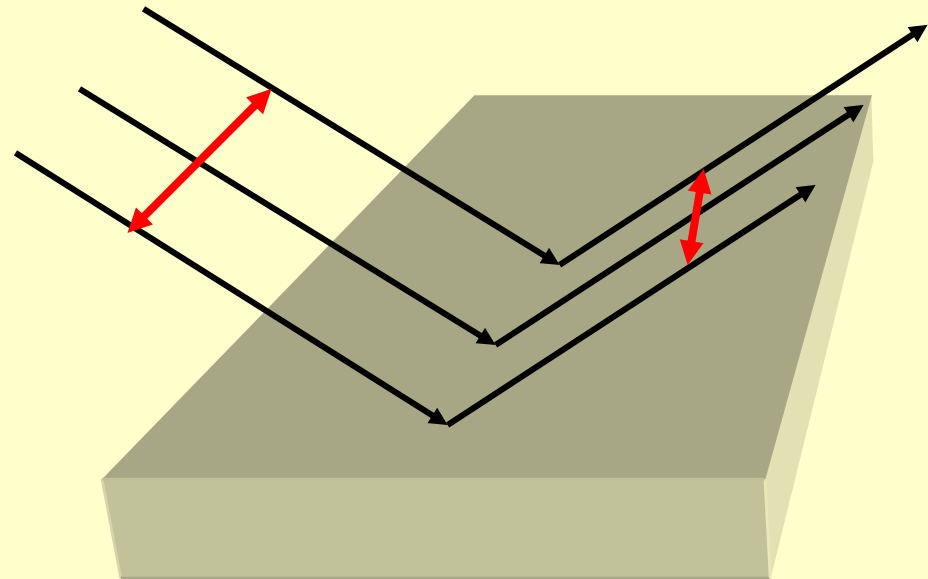
# Polarisation durch Reflexion

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

→ Transmittiertes Licht ist vollständig polarisiert!

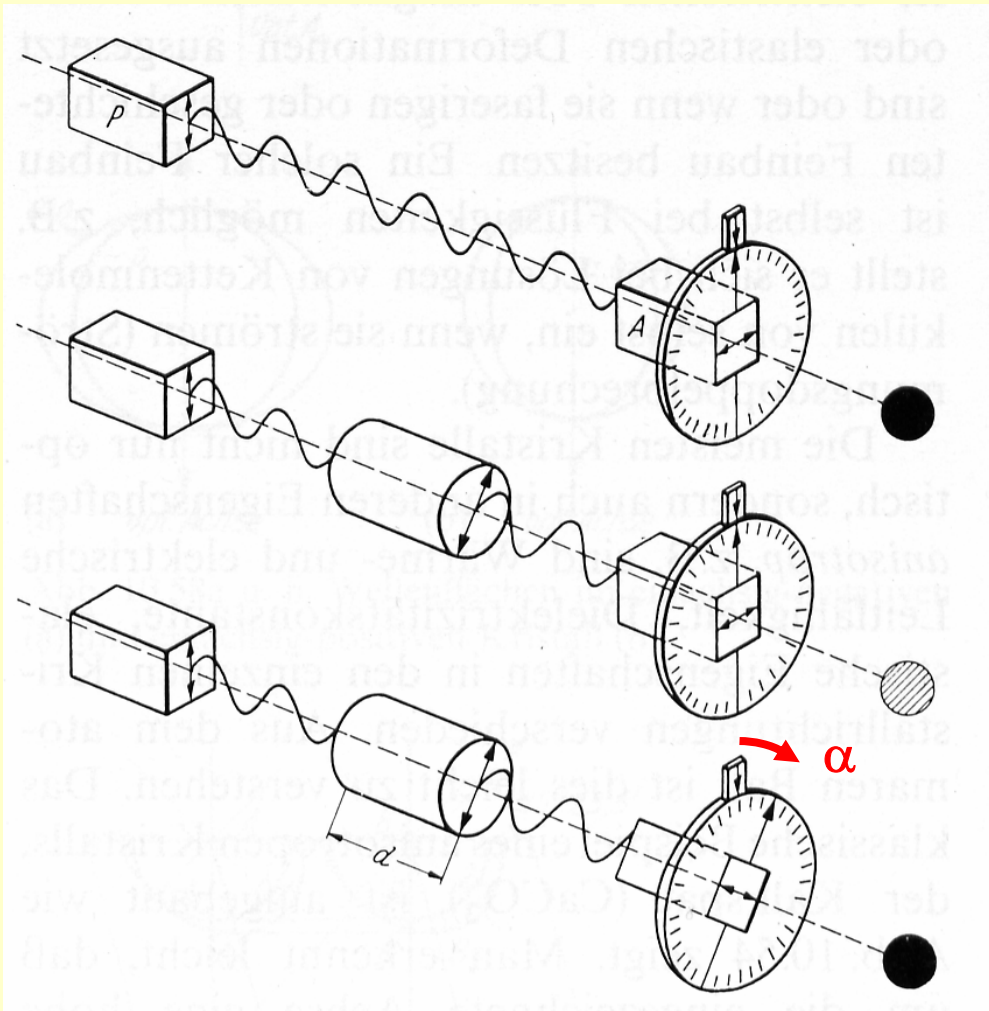


E-Feldvektor parallel zur Einfallsebene und  $\alpha = \alpha_b$ : Licht wird transmittiert, aber kein Licht wird reflektiert !



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

# Polarimetrie



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

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

$\alpha_0$  heißt spezifische Drehung

Genauer  $\alpha$  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

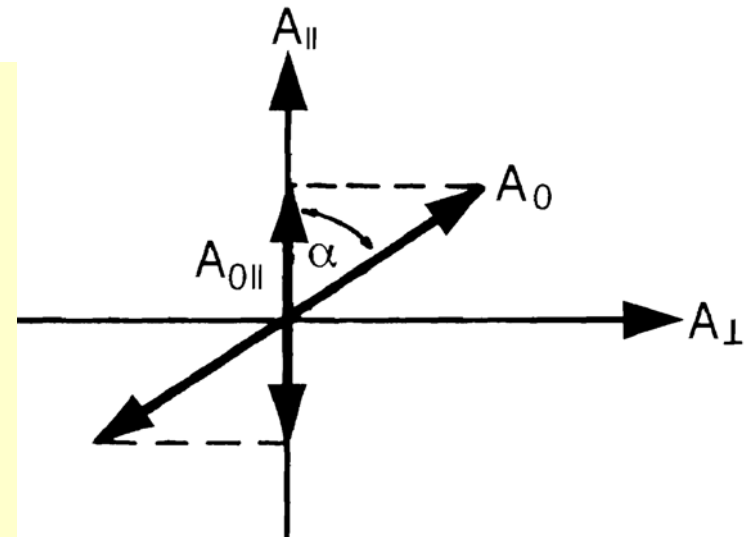
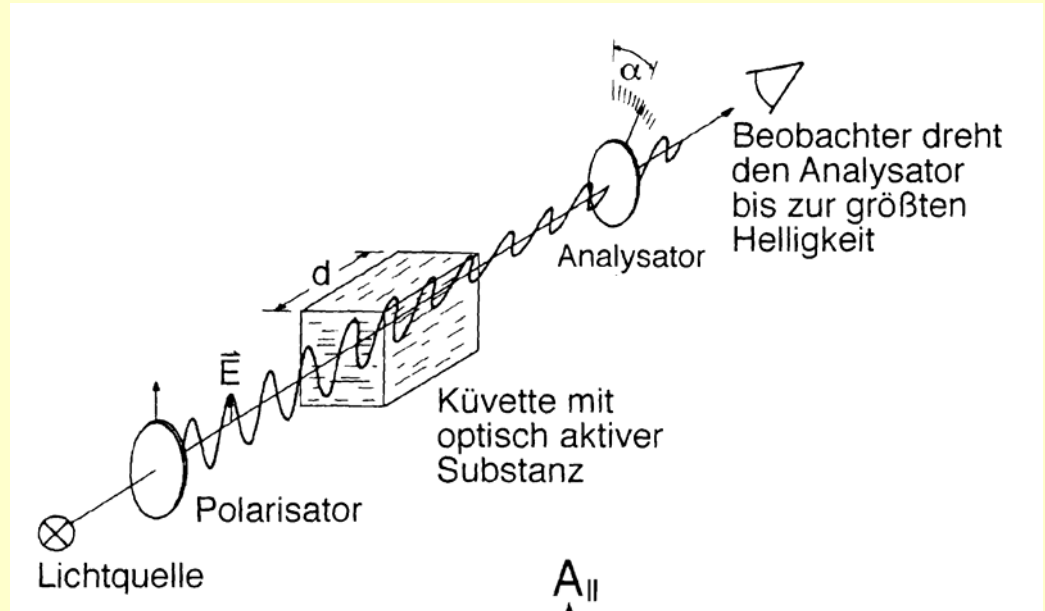
$$A_d = A_0 \cos \alpha$$

⇒ für Intensitäten

$$I \sim A^2$$

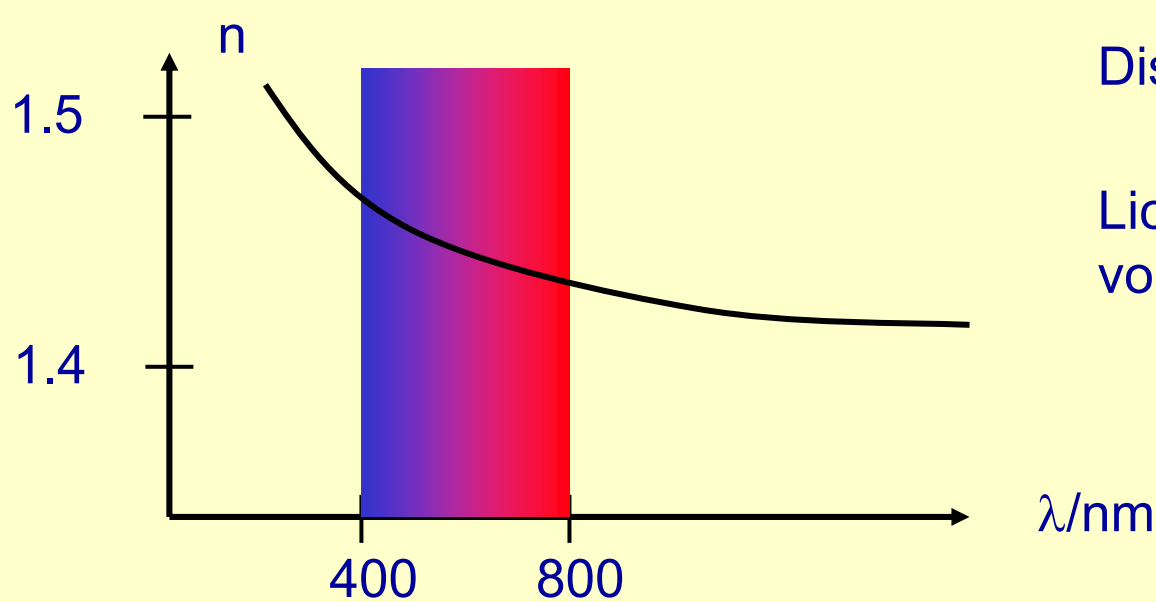
⇒ Gesetz von Malus

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



Lattenzaun-Analogon (Welle auf Seil)  
Beachte aber Mikrowellenversuch mit Drahtgitter!

# Dispersion



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

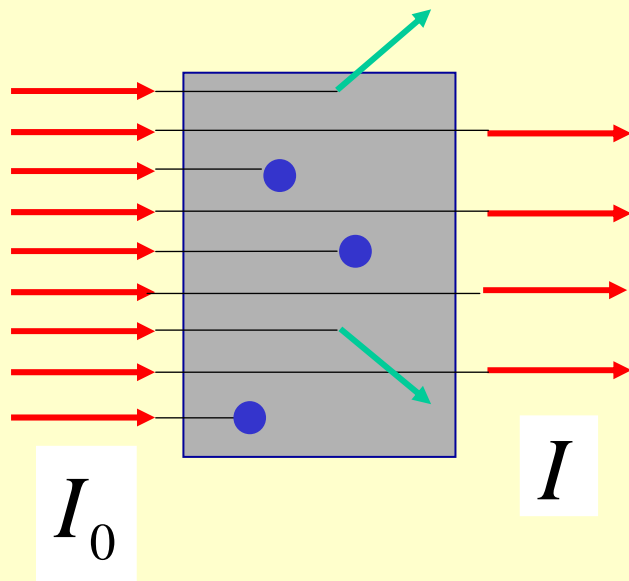
Lichtgeschwindigkeit abhängig von Frequenz (oder Wellenlänge)

**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)

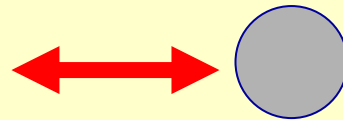
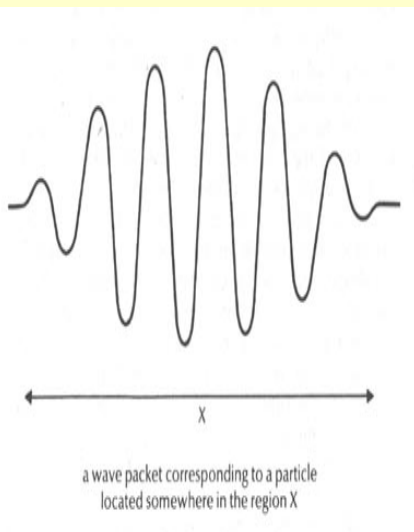
# Laser / Welle-Teilchen-Dualismus

## Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



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

$$E = h\nu$$



### Welle-Teilchen-Dualismus:

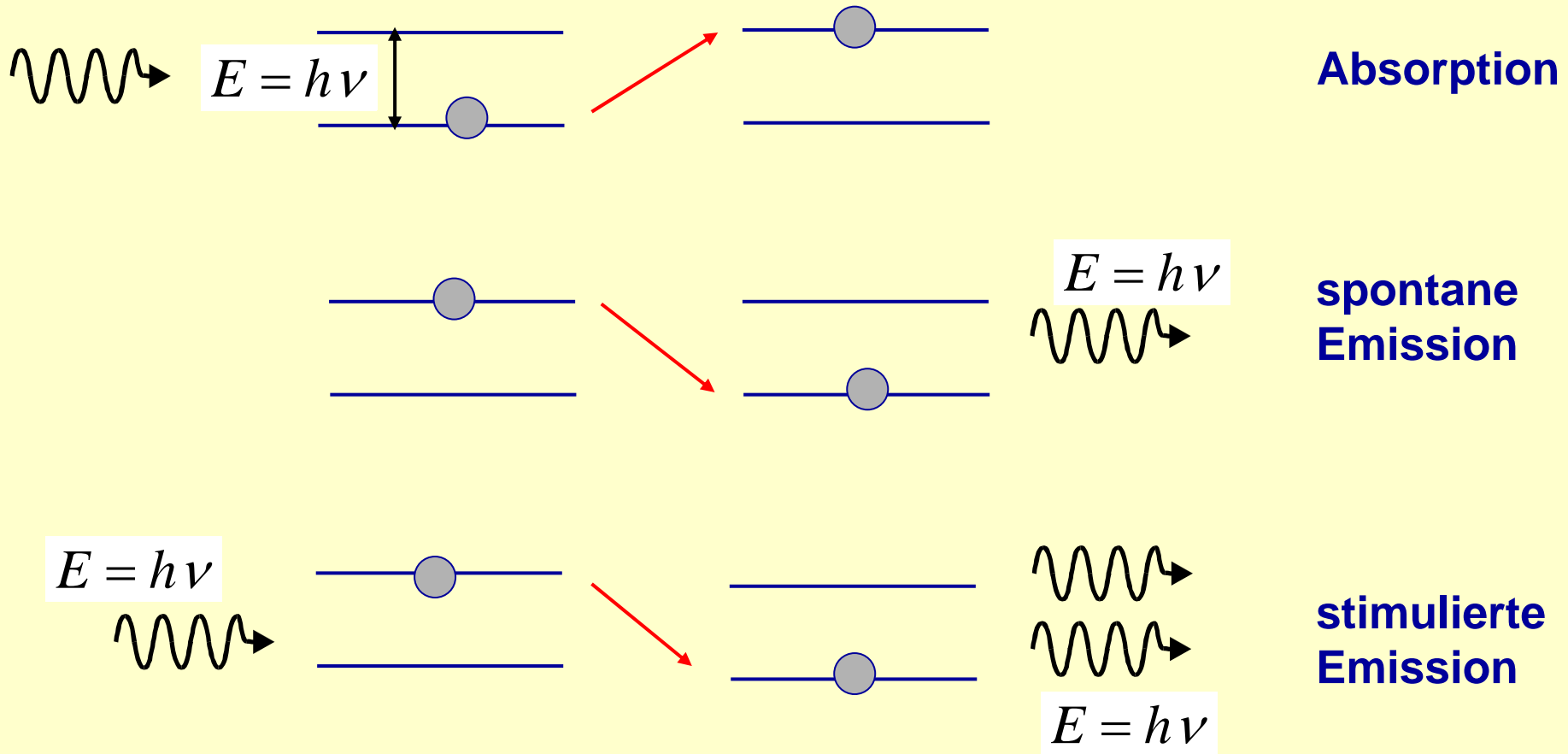
Bei Emissions- und Absorptionsvorgängen wirkt Licht wie ein Strom von Teilchen, den **Photonen**, mit der Energie  $E=h \cdot f$

**Energiequantum**  $E=h \cdot f$

**Plancksches Wirkungsquantum**  $h$

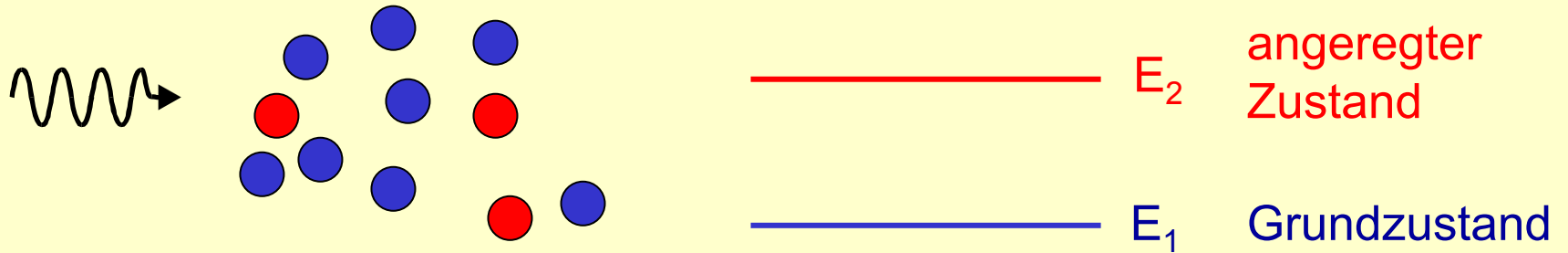
$h = 6.6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

# Laser / Elementarprozesse

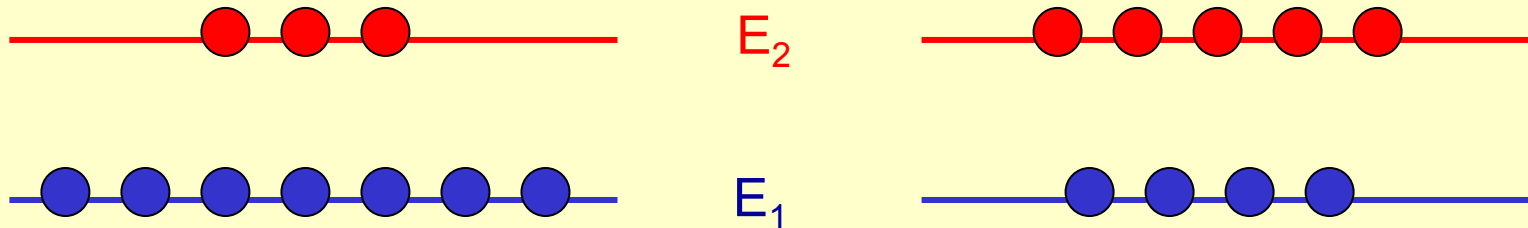


Laserlicht hat - **feste Frequenz** (Wellenlänge): monochromatisch  
- **feste Phasenbeziehung**: konstruktive Überlagerung

# Laser / Besetzungsinversion



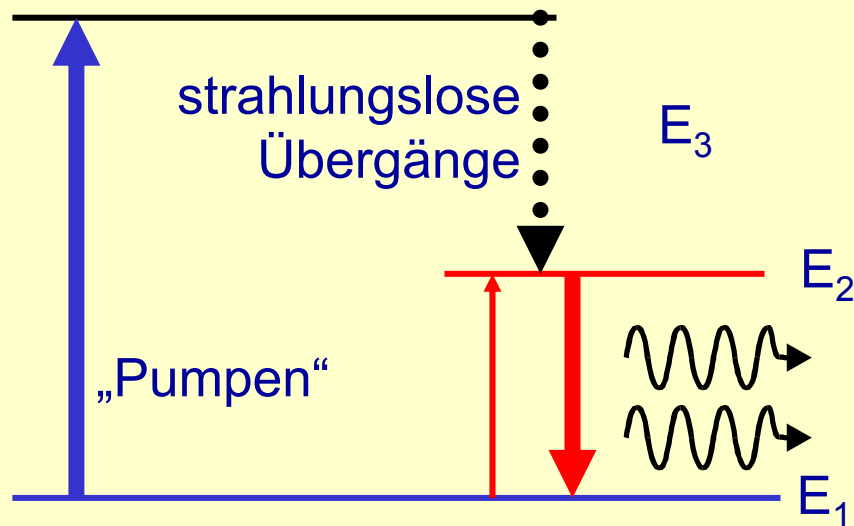
Im thermodynamischen Gleichgewicht: Anzahl  $N_1$  der Atome im Grundzustand  $E_1$  höher derer ( $N_2$ ) im angeregten Zustand  $E_2$ , d.h.  $N_1 > N_2$  und daher: Absorption aus Grundzustand überwiegt stimulierte Emission aus angeregtem Zustand



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

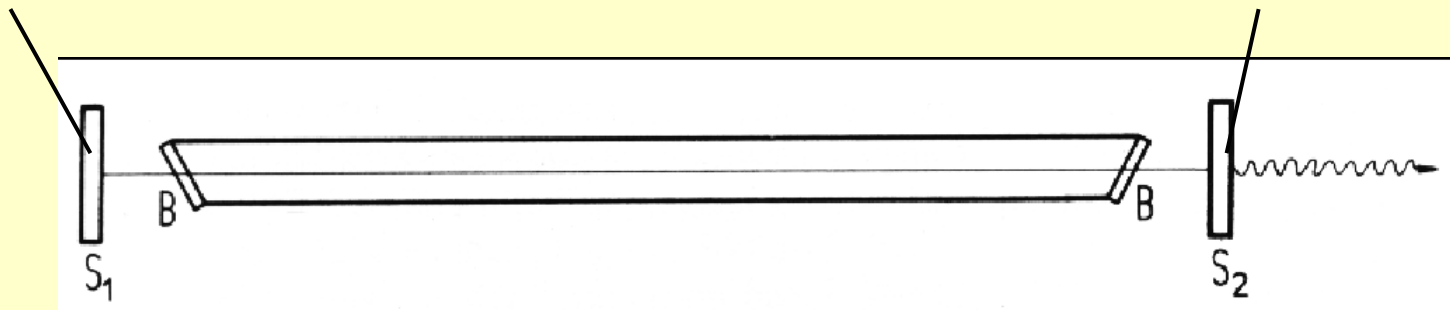
## Besetzungsinversion:

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

## Laser:

- stimulierte Emission bei Besetzungsinversion
- Resonator

vollständig  
reflektierend



# Laser in der Medizin

## Laserlicht:

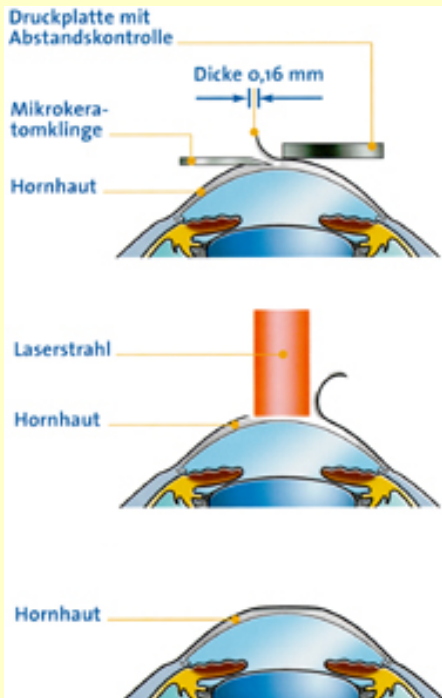
- extrem intensiv
- monochromatisch
- kohärent
- gebündelt

**Thermochemische Prozesse:** Laserchirurgie  
(Koagulieren, Schneiden, Verdampfen)

**Photochemische Reaktionen:** Photochemotherapie (Nekrotisieren)

**Mechanische Effekte** (optischer Durchschlag):

Laserchirurgie, Mikrochirurgie



LASIK



Before



After

Tattoo-  
Entfernung