

Wellenoptik.

Auflösung des Lichtmikroskops.

Dr. Balázs Kiss

Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,
Institut für Biophysik und Strahlenbiologie.

23. September 2026.



SEMMELWEIS
UNIVERSITY 1769

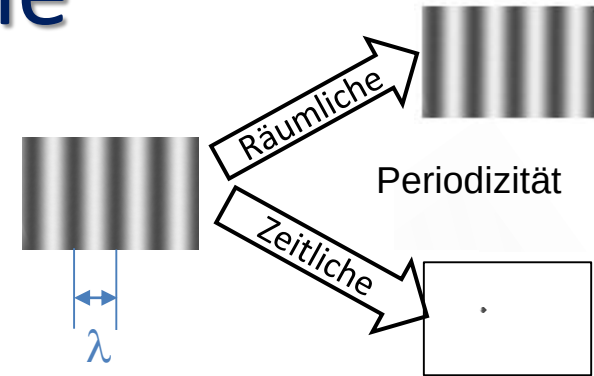
Licht als Welle

Welle: eine sich räumlich ausbreitende periodische Schwingung

Wellenlänge: der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase.

Wellenlänge (λ), Frequenz (f), Ausbreitungsgeschwindigkeit (c)

$$c = \lambda \cdot f$$

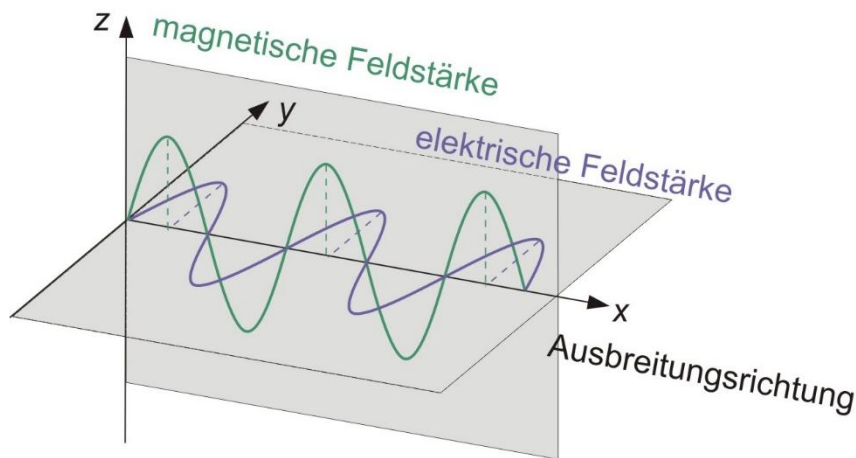


Licht = elektromagnetische Welle

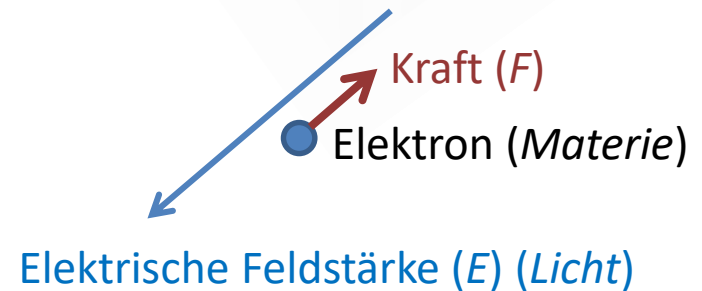
- Transversalwelle**

Schwingungsrichtung steht senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

- Lichtgeschwindigkeit im Vakuum:** $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$



Wechselwirkung mit der Materie



$$F = e \cdot E$$

e: Elementarladung
= $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

Wegen dieser Wechselwirkung ist die Lichtgeschwindigkeit in Medium immer geringer als in Vakuum.

Wellenlängenbereiche des Lichts



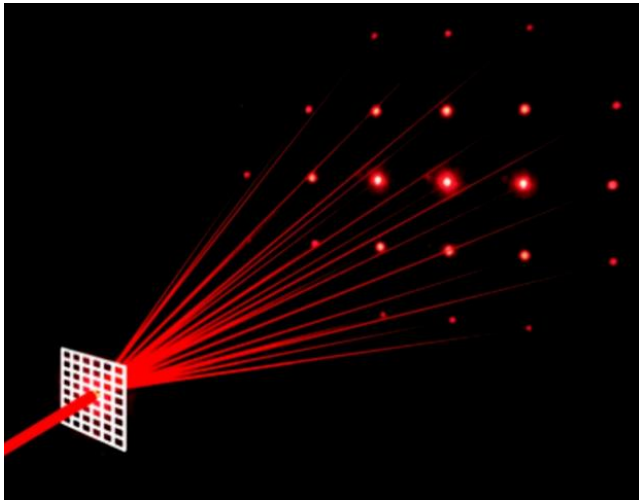
Isaac Newton designing the
cover for Pink Floyd's album
(1660)

Wellenlänge	Abkürzung	Bezeichnung
100–280 nm	UV-C*	(fernes UV)
280–315 nm	UV-B	(Dorno-Strahlung)
315–400 nm	UV-A	(nahes UV)
400–420 nm	VIS	Violett
420–490 nm		Blau
490–540 nm		Grün
540–600 nm		Gelb
600–760 nm		Rot
0,76–1,4 µm	IR-A	(nahes IR)
1,4–3 µm	IR-B	(mittleres IR)
3–1000 µm	IR-C	(fernes IR)

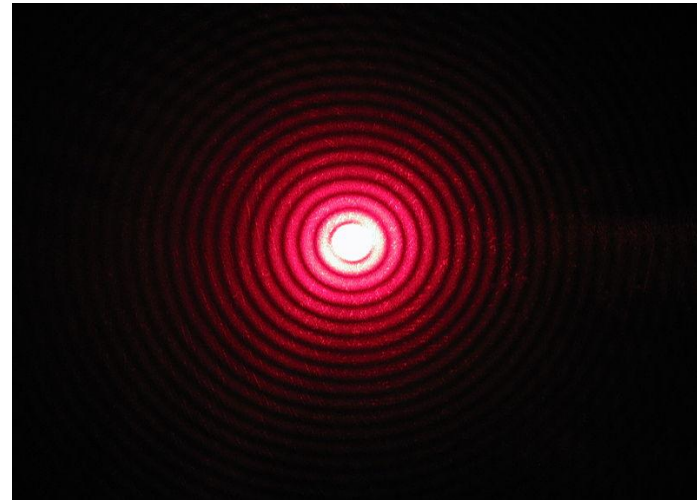
*Unterhalb 180 nm: Vakuum-UV, weil er von N_2 und O_2 Molekülen (Luft) absorbiert wird und deswegen kann sich nur im Vakuum fortpflanzen.

Beugung (Diffraction) des Lichtes

Beweis für den Wellencharakter des Lichtes



Beugung eines **Laserstrahls** an einem zweidimensionalen **optischen Gitter**



Beugung eines **Laserstrahls** an einem **Loch**

Beugung von **weißem Licht** an einem **optischen Gitter**



Beugung ist Wellenlänge-abhängig!

↑ Hauptmaximum
Nebenmaximum 2-ter Ordnung Nebenmaximum 1-ter Ordnung Nebenmaximum 1-ter Ordnung Nebenmaximum 2-ter Ordnung

Das Huygens-Prinzip

Wenn Licht durch einen Spalt tritt, der vergleichbar mit der Wellenlänge ist, muss der Wellencharakter berücksichtigt werden. Bestimmte Phänomene lassen sich nicht durch geometrische Optik erklären!



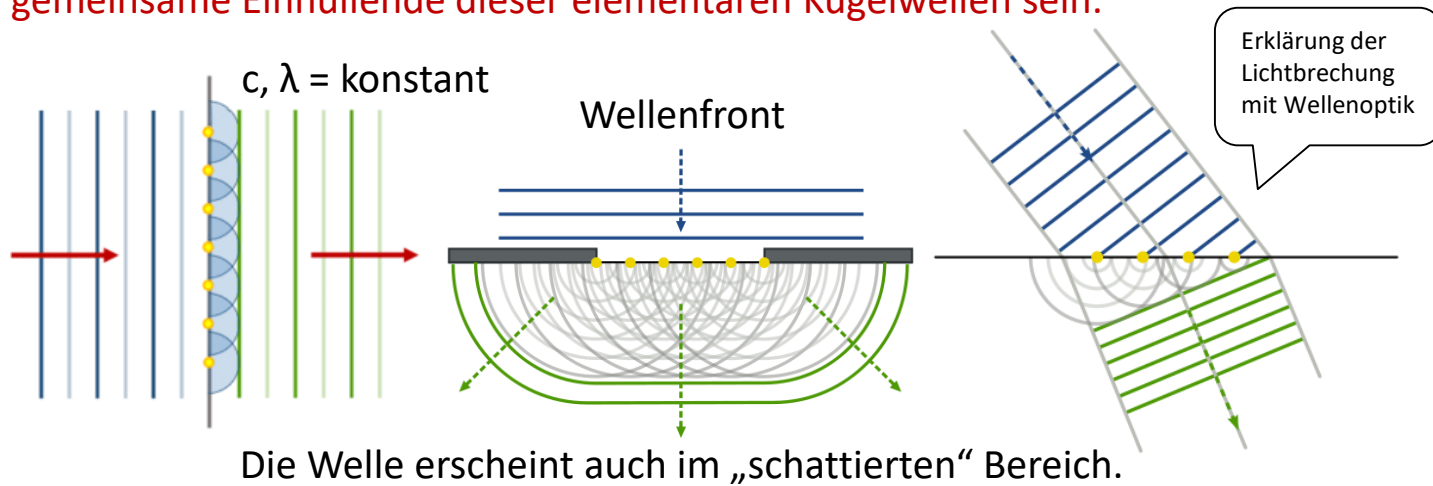
Huygenssches Prinzip: Jeder Punkt einer Wellenfront kann eine Quelle zusätzlicher, elementarer Kugelwellen sein. Im Wellenfeld wird die neue Wellenoberfläche die gemeinsame Einhüllende dieser elementaren Kugelwellen sein.



Christiaan Huygens
(1629-1695)



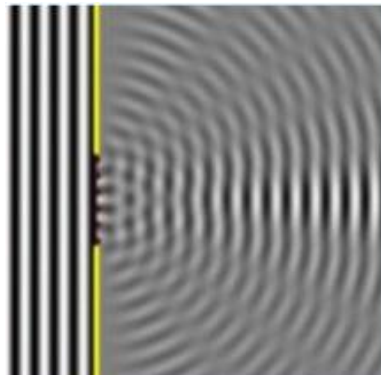
Augustin-Jean Fresnel
(1788-1827)



Diffraction - Grundprinzipie

Huygenssches Prinzip:

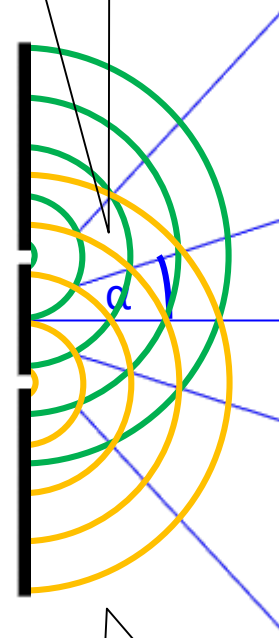
jeder Punkt einer Wellenfront dient als Ausgangspunkt einer neuen Welle



Thomas Young: Doppelspaltexperiment

Interferenzmuster entsteht durch Beugung der Wellenausbreitung am Doppelspalt. Bei monochromatischem Licht besteht dieses Muster auf dem Schirm aus **hellen Streifen (Maxima)** und **dunklen Streifen (Minima)**.

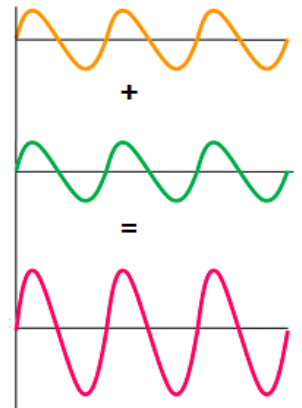
α : Beugungswinkel



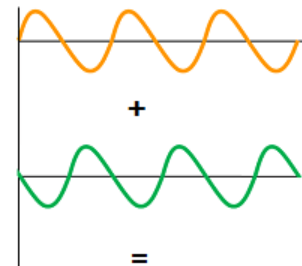
Interferenz:

Überlagerung von zwei Wellen mit festen Phasenbeziehungen.

max
min
max
min
max
min
max
min
max
min
max
min
max



konstruktive Interferenz:
Verstärkung



destruktive Interferenz:
Auslöschung

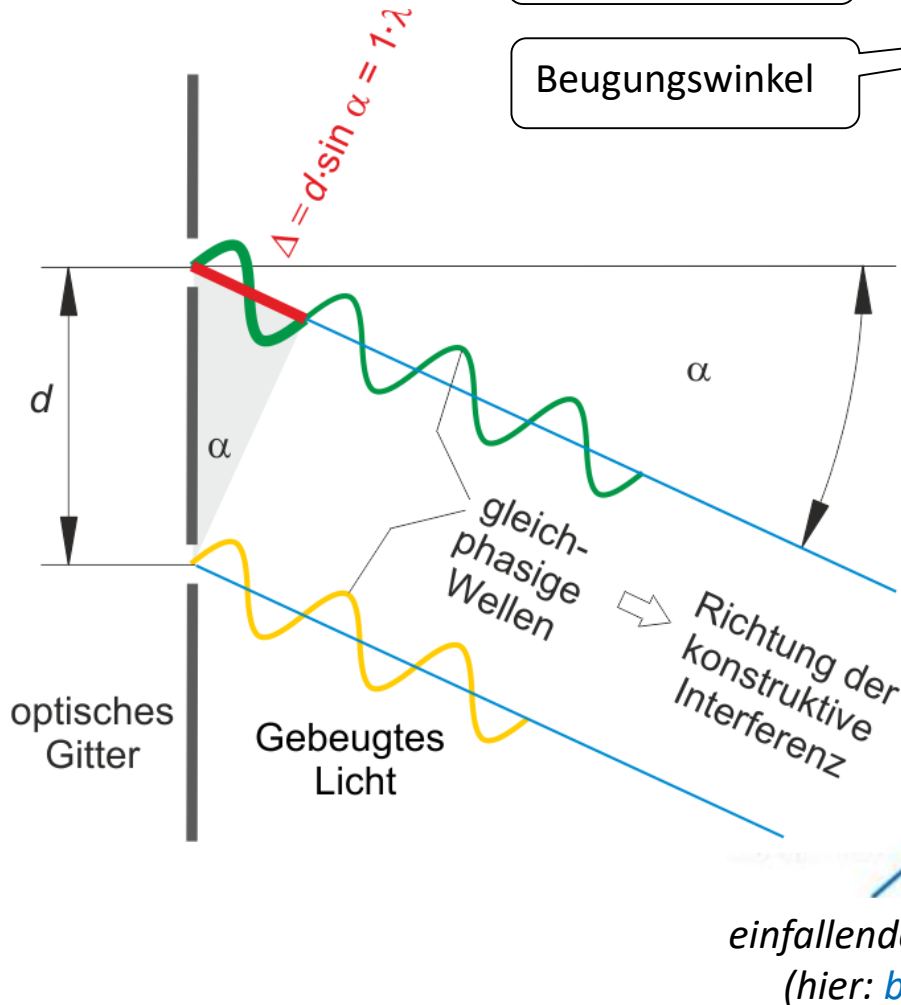
Diffraktionsgleichung

Gitterkonstante

Beugungswinkel

$$d \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda$$

wobei $k = 0, 1, 2, 3, \dots$



d : Struktur

Materie

λ : Wellenlänge

Licht



$k=2$

$k=1$

$k=0$

$k=1$

$k=2$

gebeugte
Strahlen

optisches
Gitter

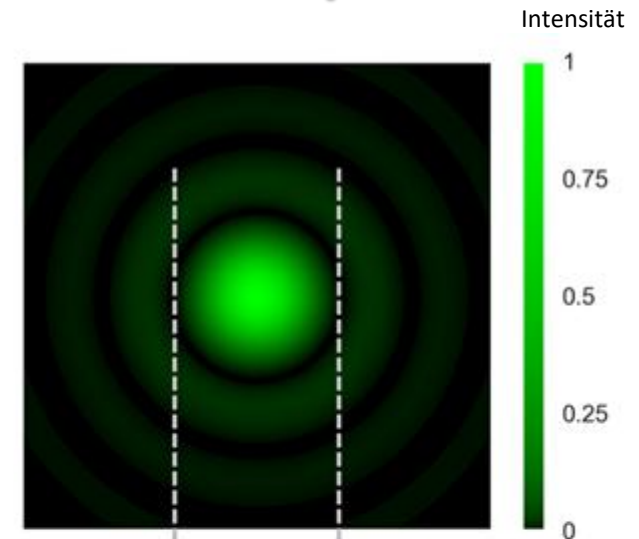
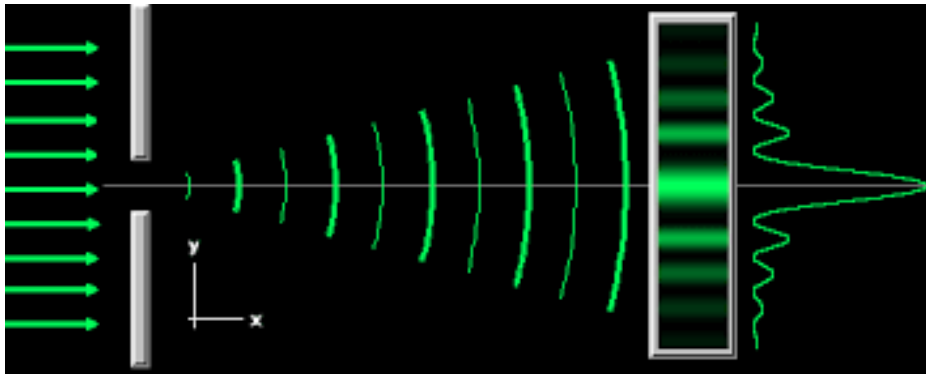
einfallendes Licht
(hier: blau)

Anwendung: Strukturuntersuchung

- Lichtmikroskop
- Röntgendiffraktion

Beugung im Lichtmikroskop

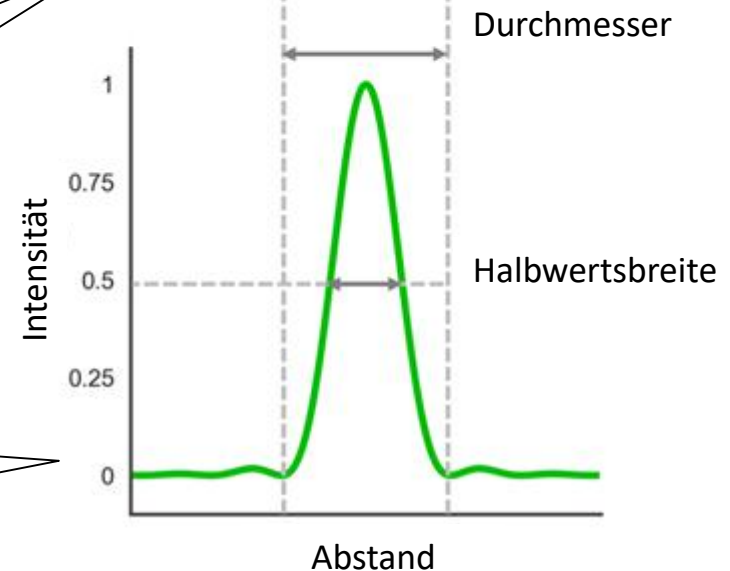
Entstehung der Beugungsscheiben:



Airy-Scheibe:

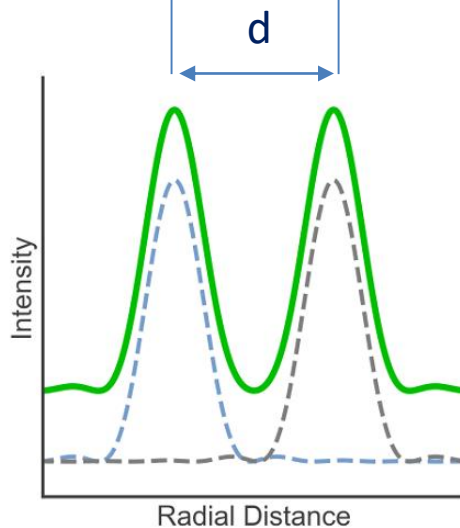
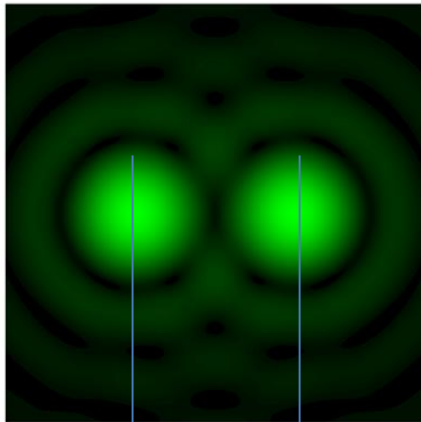
zentrales Maximum, umgeben von Ringen abnehmender Intensität.

Das zentrale Maximum enthält ~84% der Intensität, die Umgebung enthält ~16% der Intensität. (Bessel-Funktion)

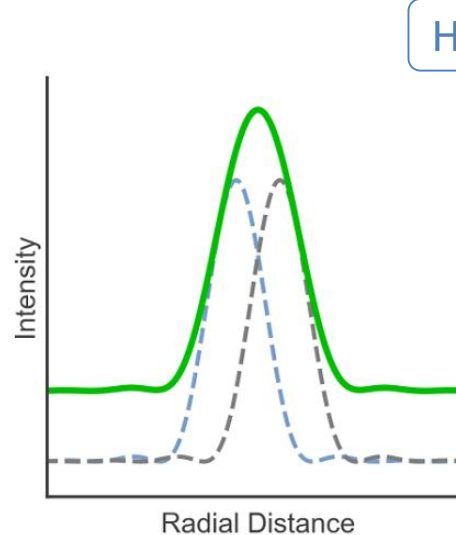
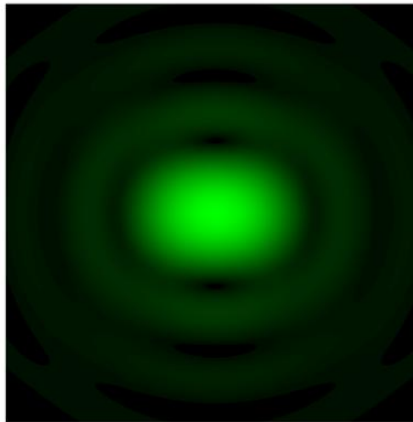


Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops

auflösbar

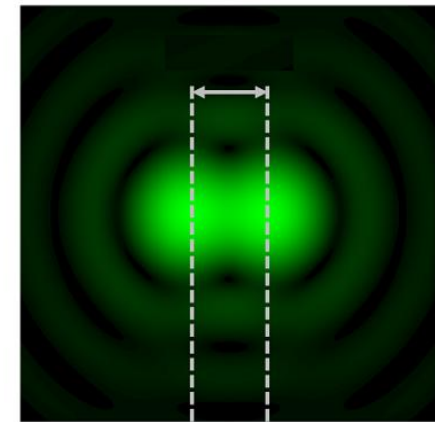


nicht mehr auflösbar



Rayleigh-Grenzfall

$$\delta = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin(\alpha)}$$



Hauptmaximum

Hauptmaximum
stimmt mit dem
1. Minimum der
benachbarten
Beugungsscheibe
überein

erstes Minimum

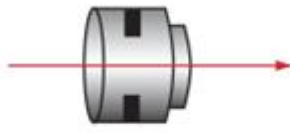
Das Abbe-Prinzip

Problem:

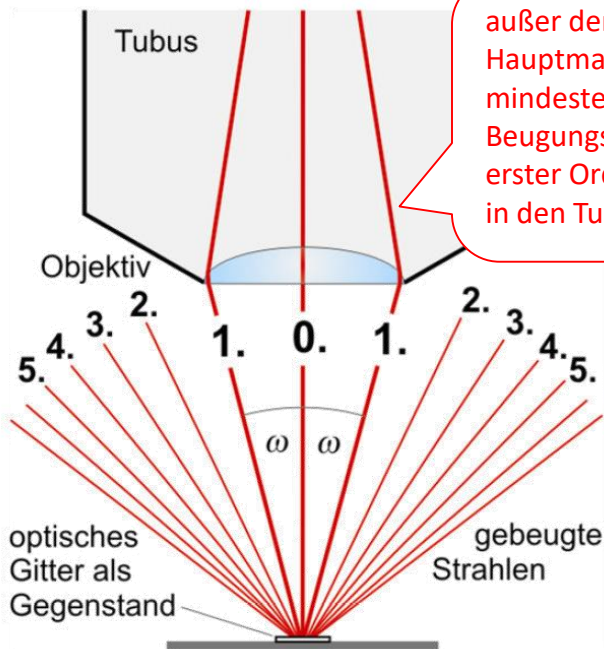
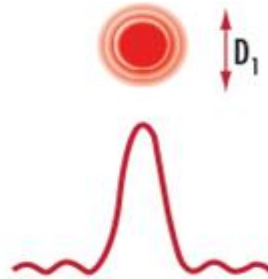
Gegenstand



Linse



Bild



außer dem Hauptmaximum mindestens die Beugungsstrahlen erster Ordnung sollen in den Tubus gelangen

Auflösungsgrenze:

$$\delta = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin(\omega)}$$

Über $V \approx 500$:
nur „leere Vergrößerung“

Auflösungsvermögen: $= \frac{1}{\delta} \left(\frac{1}{nm} \right)$

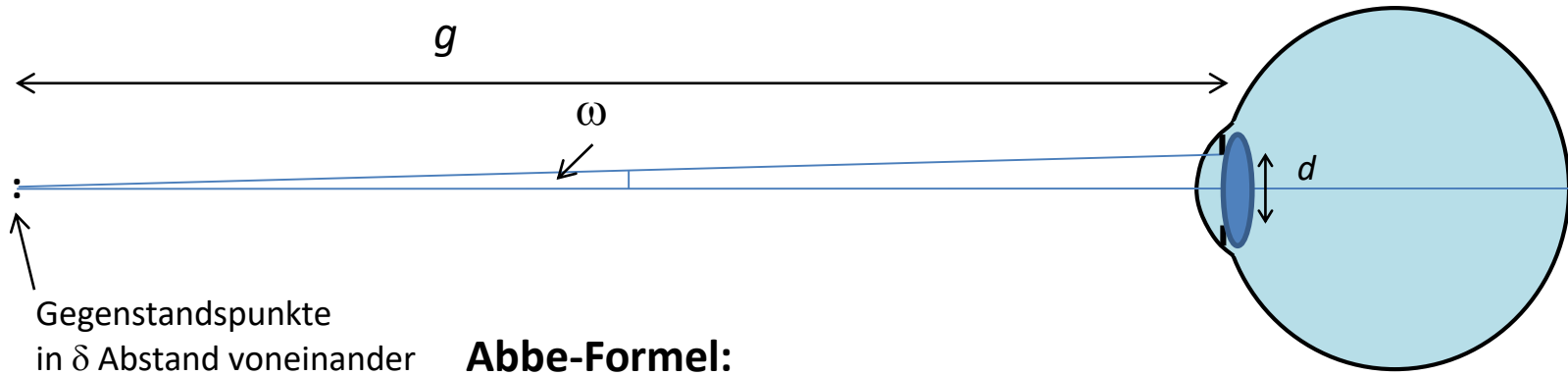
Abbe-Grenze:

$\delta \sim 200 \text{ nm}$

Für eine bessere Auflösung:

- λ : Wellenlänge erniedrigen
 - blauer Lichtfilter,
 - UV-Licht,
- n : Brechungsindex des Mediums unter Objektiv erhöhen (Immersionöl)
- ω : halben Öffnungswinkel erhöhen

Auflösungsgrenze des Auges



$$\delta = 0,61 \frac{\lambda}{\sin \omega} \approx 0,61 \frac{\lambda}{\frac{d/2}{g}} = 1,22 \frac{\lambda \cdot g}{d}$$

für kleine Winkel:
 $\sin(\alpha) = \tan(\alpha) = \alpha$ (rad)

Gegenstandspunkte
 in δ Abstand voneinander

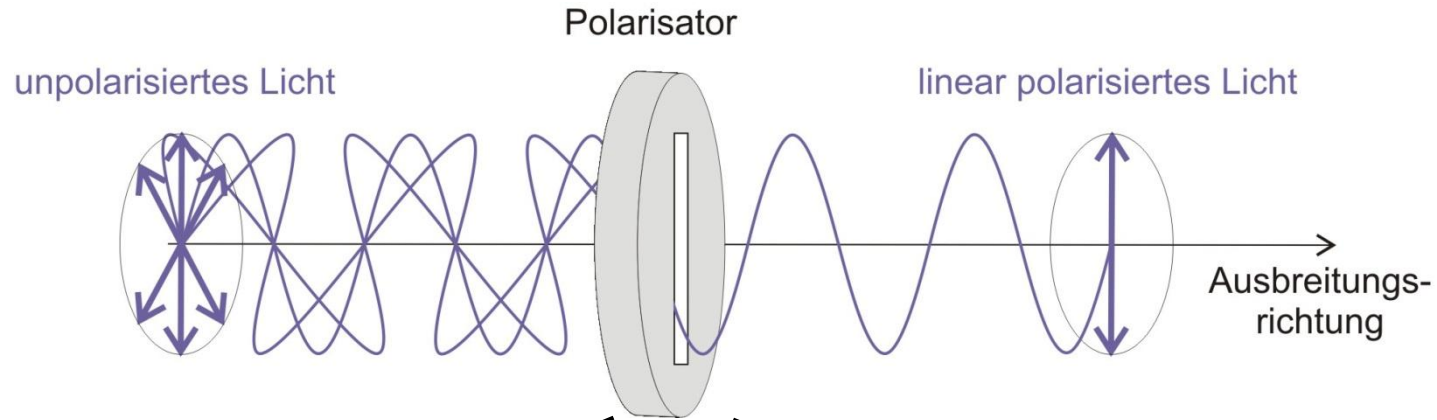
Schwinkelgrenze: $\Theta = \frac{\delta}{g} = 1,22 \frac{\lambda}{d}$



Schwinkelgrenze:

$$\Theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Lineare Polarisation des Lichtes

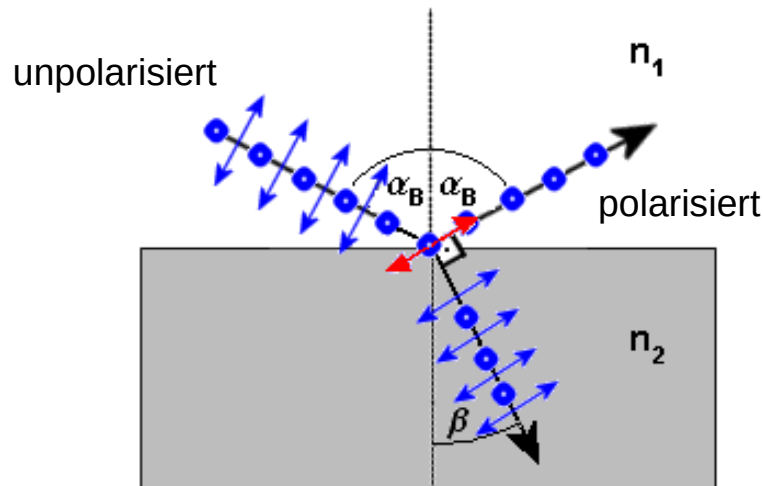


Spiegel
(Reflexion)

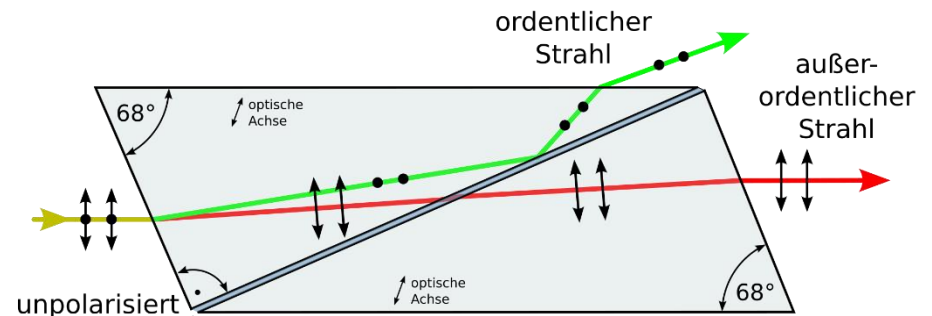
Polarisationsfilter
(Absorption)



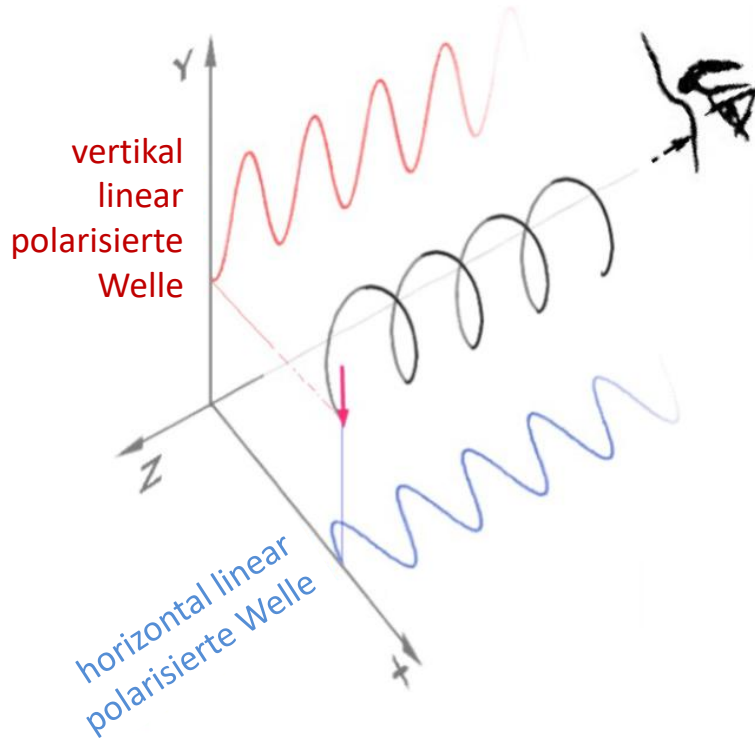
α_B = Brewster-Winkel: $\tan(\alpha_B) = n_2/n_1$



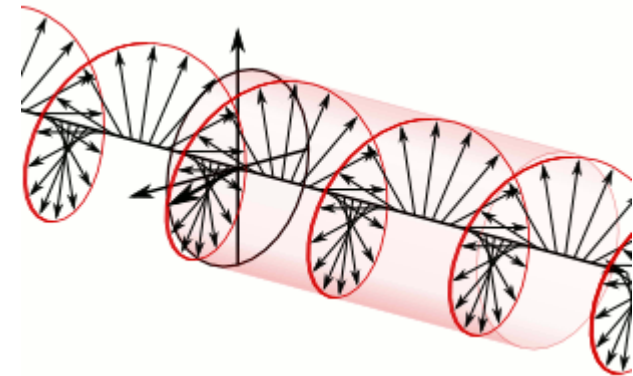
- doppelbrechende Kristalle
- Nicolsches Prisma
- Polymere



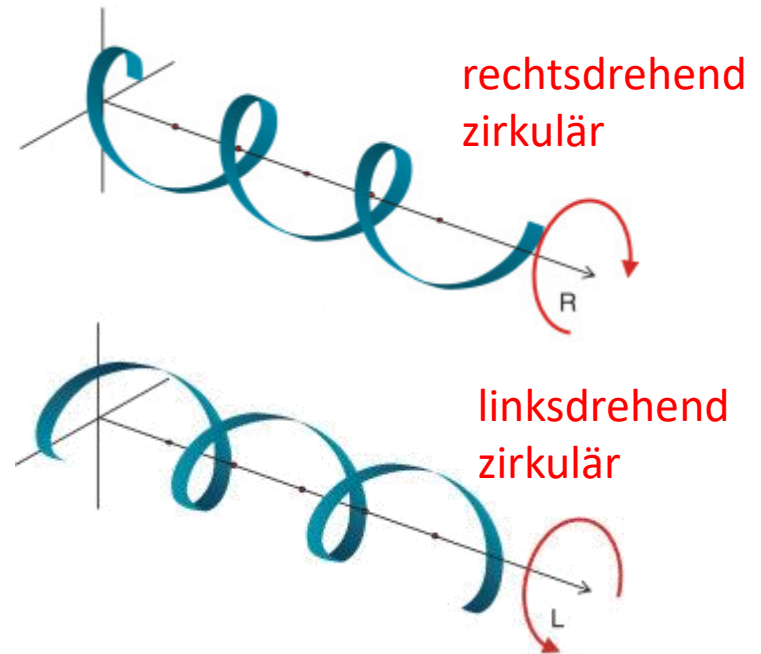
Zirkularpolarisation des Lichtes



- Phasenunterschied: $+\lambda/4$ or $-\lambda/4$
- Linear polarisiertes Licht: Summe von linksdrehend und rechtsdrehend zirkular polarisierte Lichtstrahlen
- Polarisationsgrad: nicht wahrnehmbar fürs Auge
- Phase: nicht wahrnehmbar fürs Auge



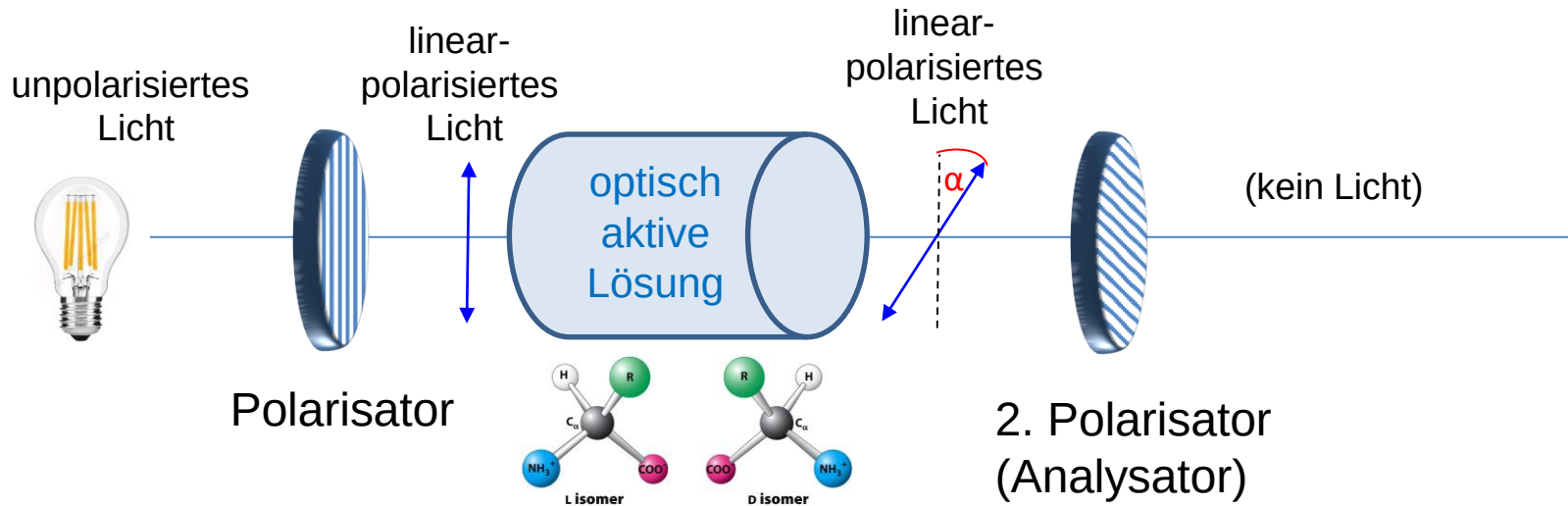
- Der elektrische Feldvektor rotiert in der Frontalebene



Optische Aktivität

Drehung der
Schwingungsebene des
linear polarisierten
Lichtes

Anwendung: **Polarimetrie** - Konzentrationsbestimmung



Biot-Gesetz:

Drehwinkel ($^{\circ}$)

Konzentration (g/cm^3)

Länge der Küvette
(dm)

$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

Drehwert, spezifisches Drehvermögen

($^{\circ} \cdot \text{cm}^3 / (\text{g} \cdot \text{dm})$) bezogen auf 20°C und auf die „D-Linie“ (589 nm) von Na



Hausaufgaben

Aufgabensammlung

2.31-32, 2.38-39

Feedback