

Elektromagnetische Strahlungen. Licht als Welle und Teilchen.

Balázs Kiss

kissb3@gmail.com



**Institut für Biophysik und Strahlenbiologie,
Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,
Semmelweis Universität**

24. September 2024.

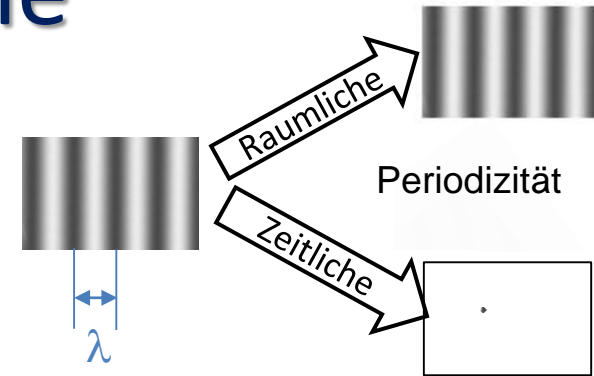
Licht als Welle

Welle: eine sich räumlich ausbreitende periodische Schwingung

Wellenlänge: der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase.

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

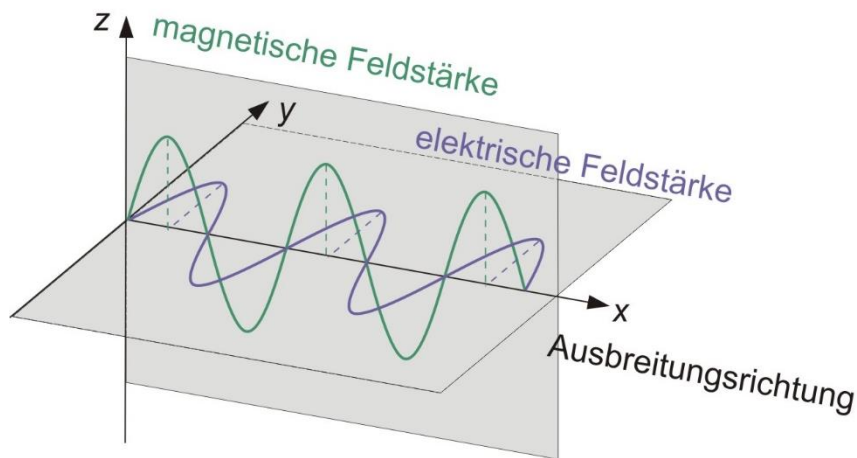
$$c = \lambda \cdot f$$



Licht = elektromagnetische Welle

Transversalwelle

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



Wechselwirkung mit der Materie



$$F = e \cdot E$$

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

Wellenlängenbereiche des Lichts

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



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

	Wellenlänge	Abkürzung	Bezeichnung
3 - 10 eV	100–280 nm	UV-C*	(fernes UV)
	280–315 nm	UV-B	(Dorno-Strahlung)
	315–400 nm	UV-A	(nahes UV)
1,5 - 3 eV	400–420 nm	VIS	Violett
	420–490 nm		Blau
	490–540 nm		Grün
	540–600 nm		Gelb
	600–760 nm		Rot
0,001 - 1 eV	0,76–1,4 µm	IR-A	(nahes IR)
	1,4–3 µm	IR-B	(mittleres IR)
	3–1000 µm	IR-C	(fernes IR)

7 Bereiche der EM-Strahlungen

Isotopen-
diagnostik



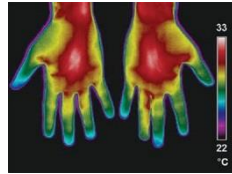
Röntgen-
diagnostik



UV-Licht
Sonnenbrand
Germizidlampe



IR-Licht
IR-Diagnostik
Wärmetherapie



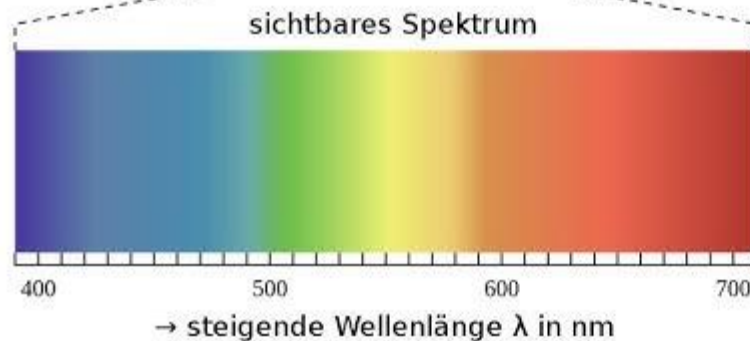
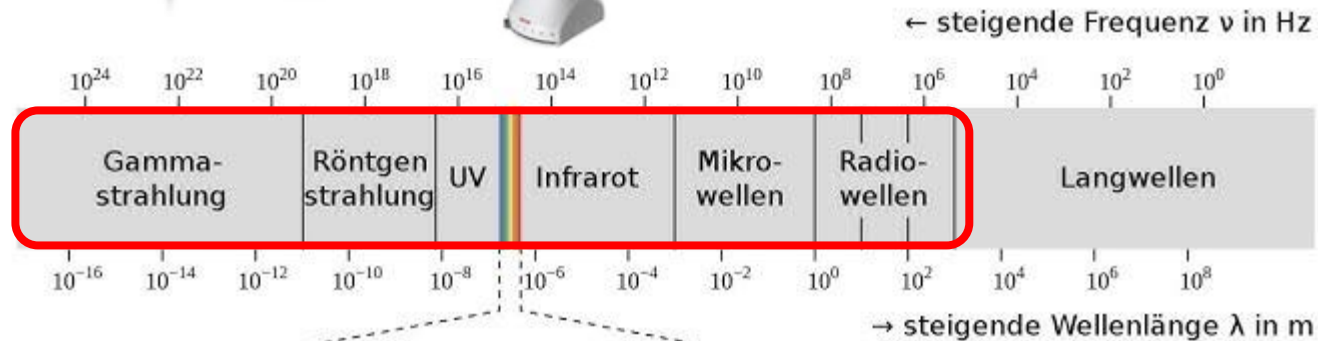
Terahertzwellen
Bodyscanner



Mikrowellen
Kurzwellentherapie



Radiowellen
MRI-Gerät

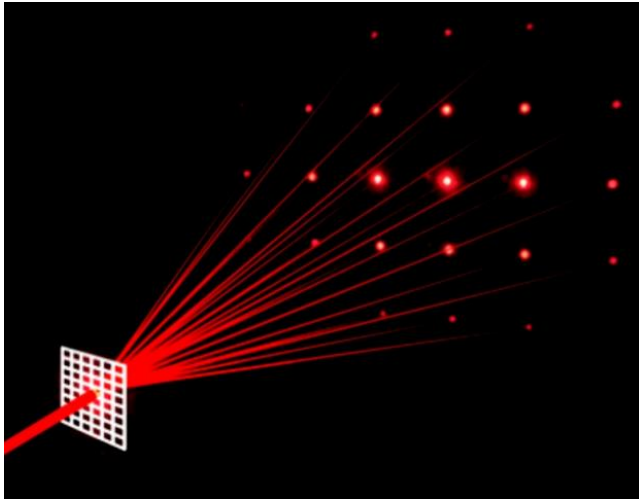


Tageslicht
Sehen

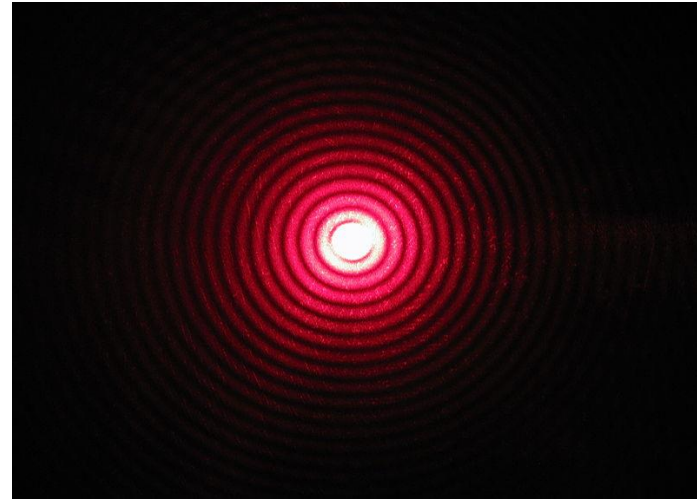


Beugung (Diffraktion) des Lichtes

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 Wellenlängeabhängig!

Hauptmaximum

Nebenmaximum
2-ter Ordnung

Nebenmaximum
1-ter Ordnung

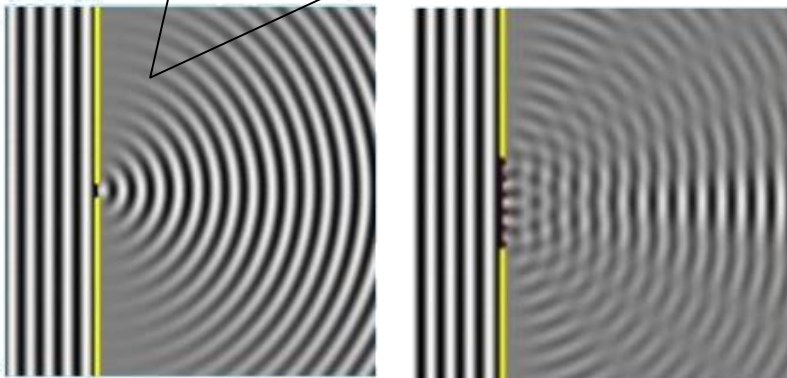
Nebenmaximum 1-ter Ordnung

Nebenmaximum 2-ter Ordnung

Diffraction - Grundprinzip

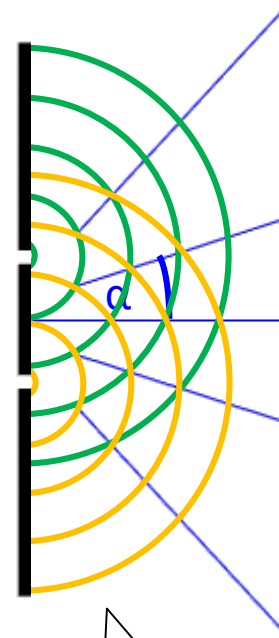
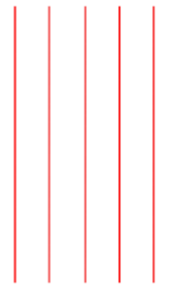
Huygensches Prinzip:

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)**.

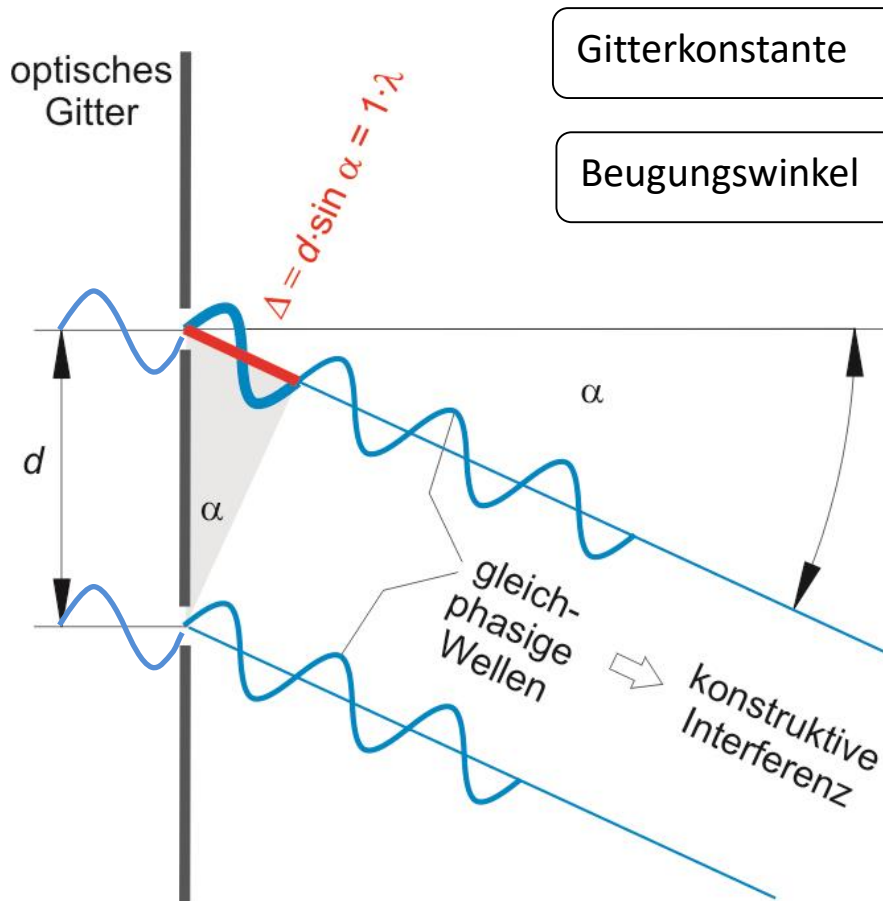


Interferenz:

Überlagerung von
zwei Wellen mit
festen Phasen-
beziehungen.



Diffraktionsgleichung



Gitterkonstante

Beugungswinkel

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

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

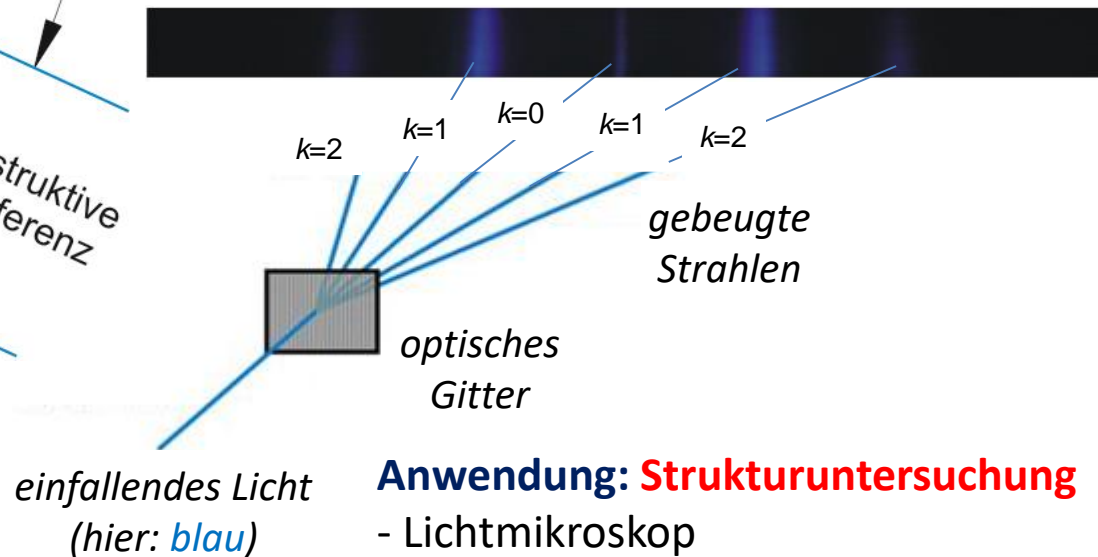
d: Struktur

λ : Wellenlänge

Materie



Licht

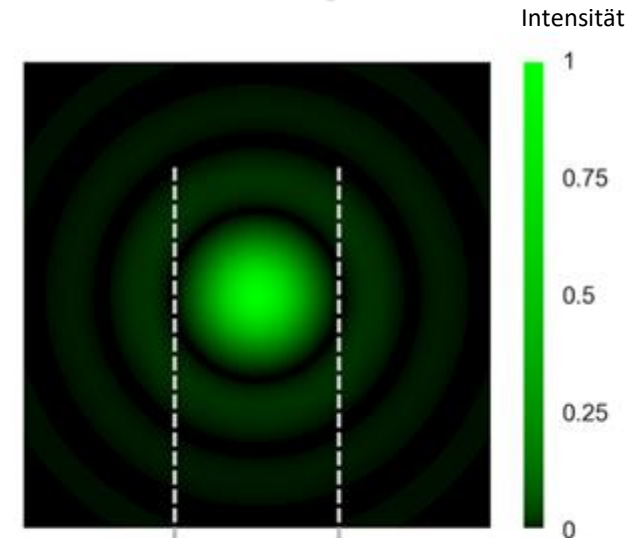
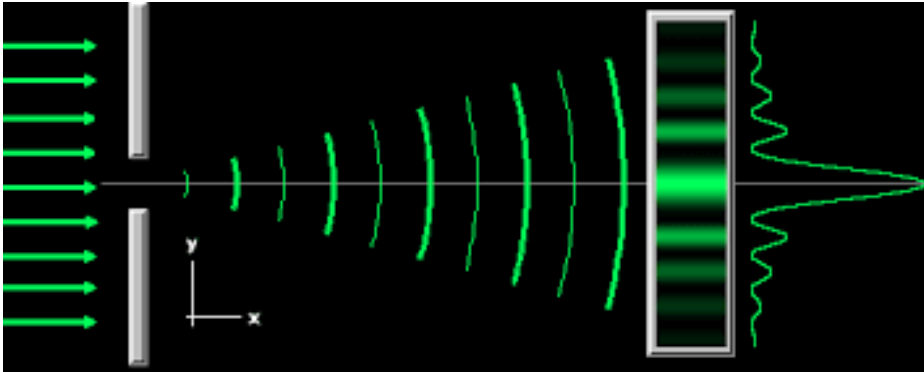


Anwendung: Strukturuntersuchung

- Lichtmikroskop
- Röntgendiffraktion

Beugung im Lichtmikroskop

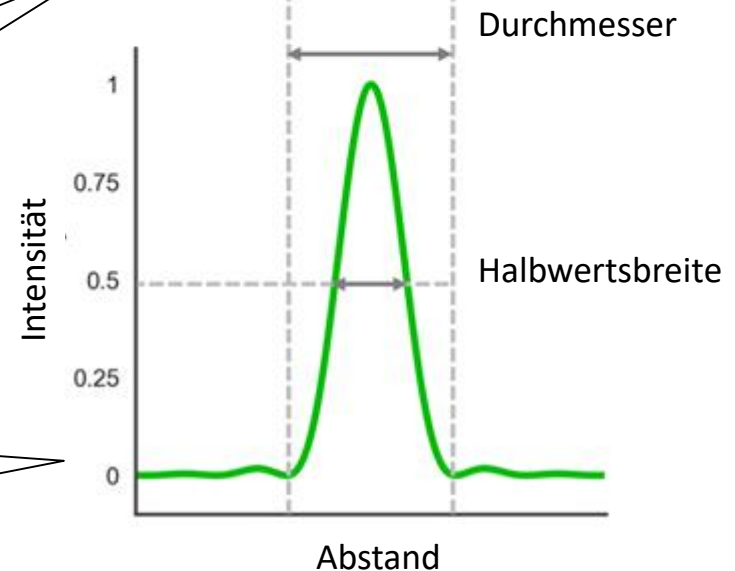
Entstehung der Beugungsscheiben:



Airy-Scheibe:

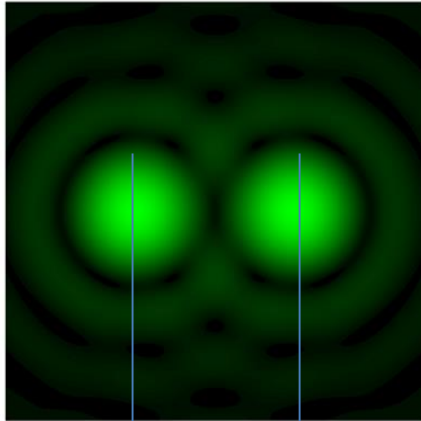
zentrales Maximum, umgeben von Ringen abnehmender Intensität.

Das zentrale Maximum enthält ~84% der Intensität, die Umgebung enthält ~16% der Intensität.

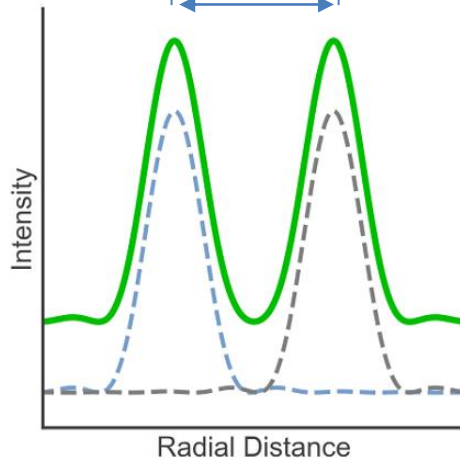


Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops

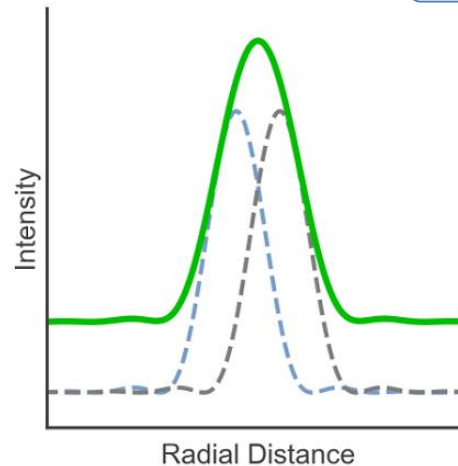
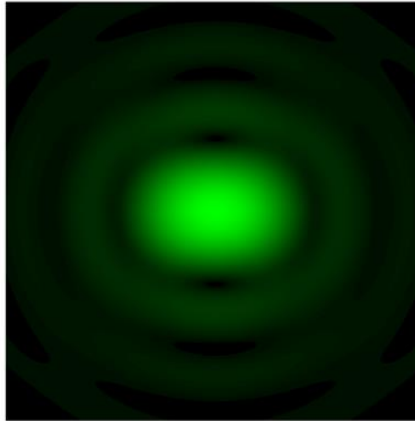
auflösbar



d

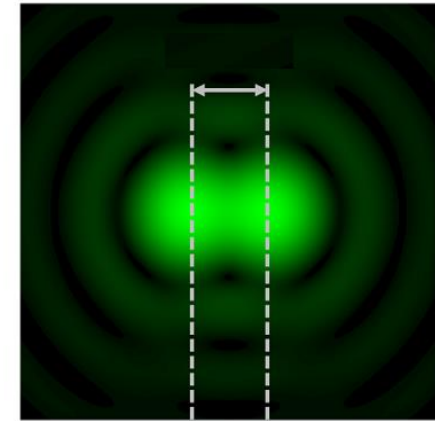


nicht mehr auflösbar

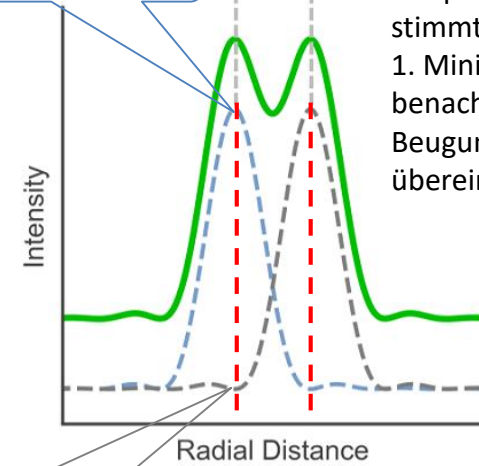


Rayleigh-Grenzfall

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



Hauptmaximum



Hauptmaximum
stimmt mit dem
1. Minimum der
benachbarten
Beugungsscheibe
überein

erstes Minimum

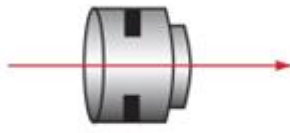
Das Abbe-Prinzip

Problem:

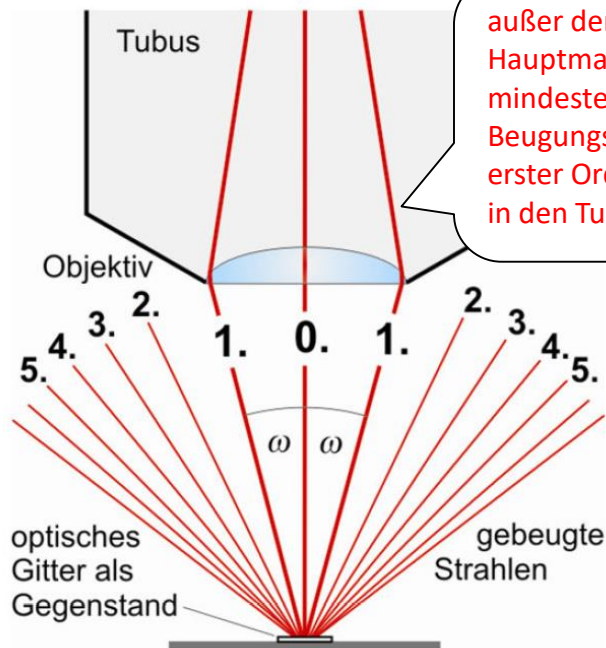
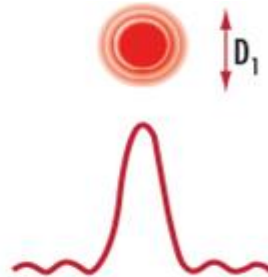
Gegenstand



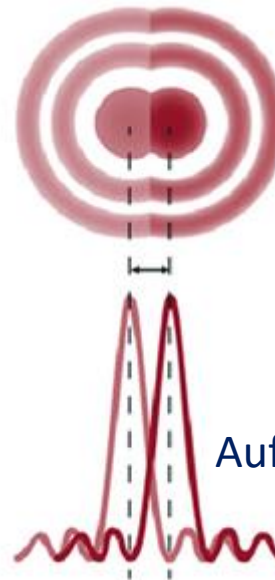
Linse



Bild



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



Abbe-Grenze:
 $\delta \sim 200 \text{ nm}$

Auflösungsgrenze:

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

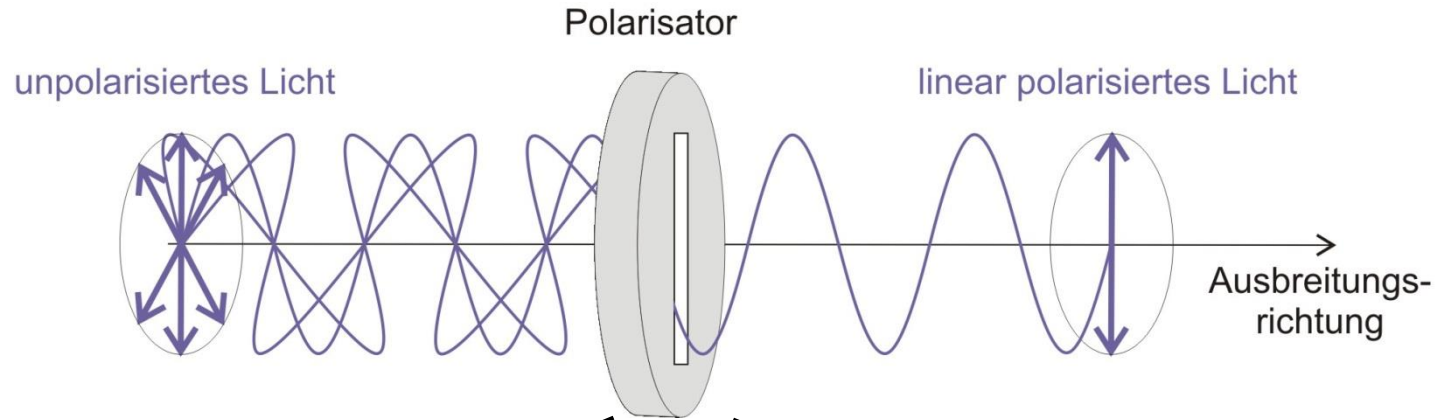
Über $V \approx 500$:
nur „leere Vergrößerung“

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

Für eine bessere Auflösung:

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

Lineare Polarisation des Lichtes

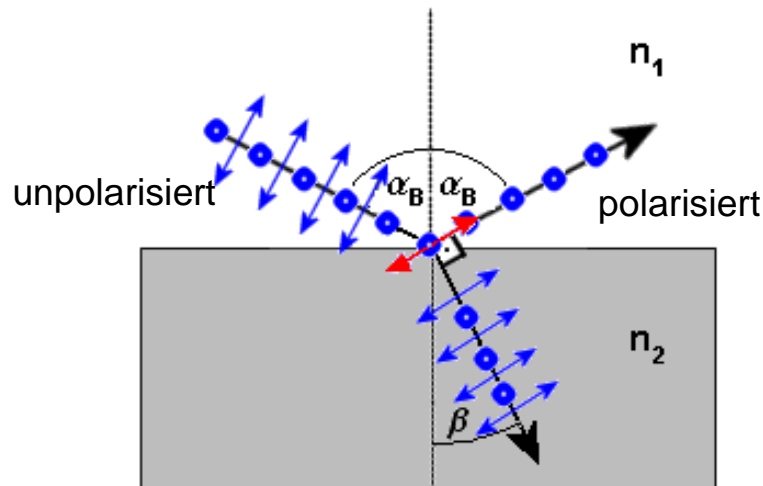


Spiegel
(Reflexion)

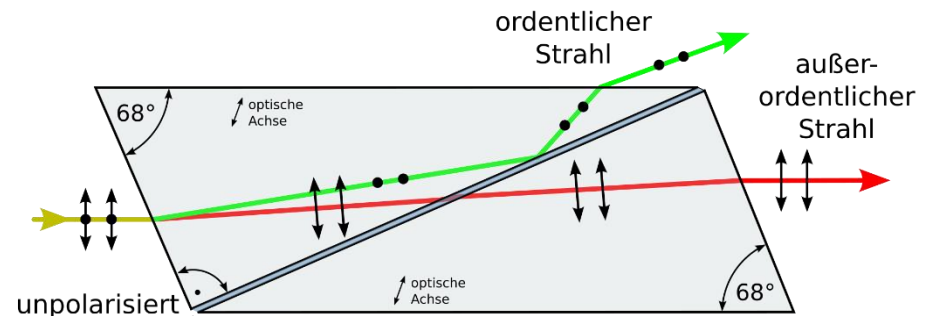
Polarisationsfilter
(Absorption)



α_B = Brewster-Winkel: $\text{tg}(\alpha_B) = n_2/n_1$



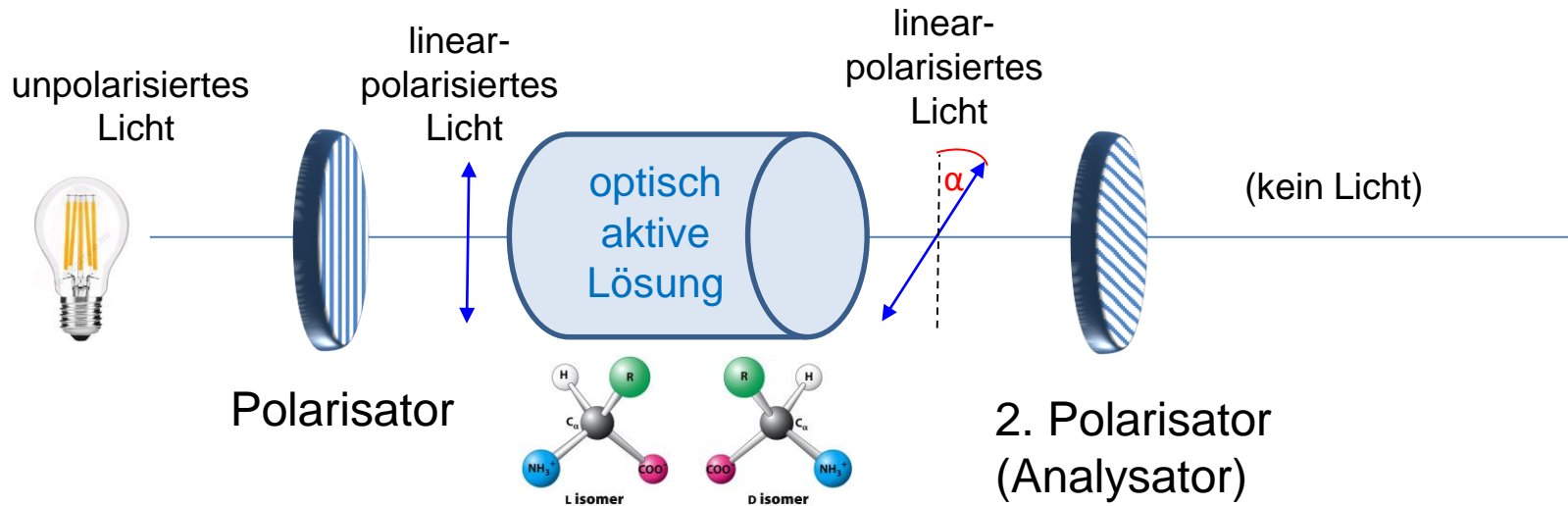
- doppelbrechende Kristalle
- Nicolsches Prisma
- Polymere



Optische Aktivität

Drehung der Schwingungsebene des linear polarisierten Lichtes

Anwendung: **Polarimetrie** - Konzentrationsbestimmung



Biot-Gesetz:

Drehwinkel ($^\circ$)

Konzentration (g/cm^3)

Länge der Küvette (dm)

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

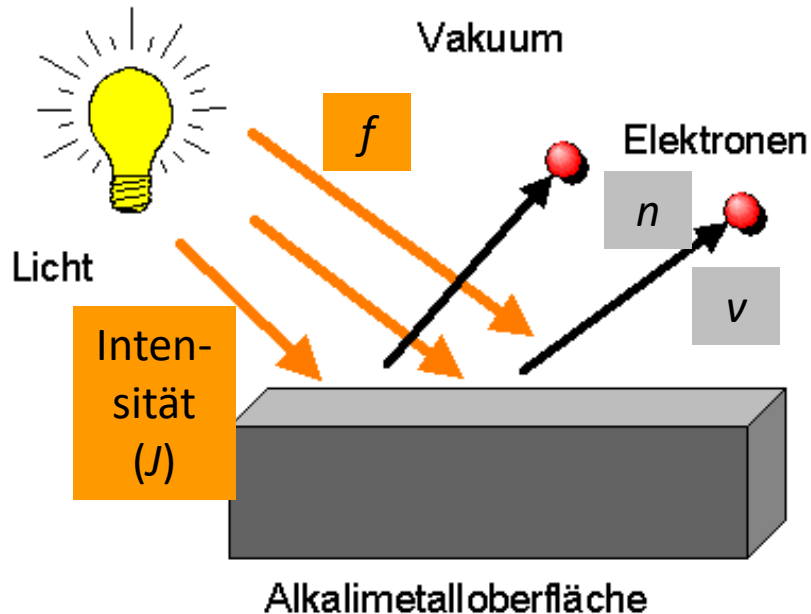
Drehwert, spezifisches Drehvermögen

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



Teilchencharakter des Lichtes

Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)



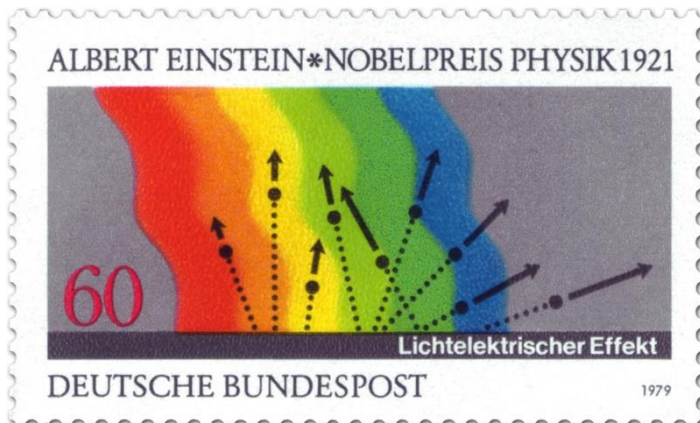
Man variiert:

- die **Frequenz (f)** des Lichtes
- die **Intensität (J)** des Lichtes

Man beobachtet:

- die **Zahl der** ausgelösten **Elektronen (n)**
- die **Geschwindigkeit** der Elektronen (**v**)

Ein Photon tritt in Wechselwirkung mit einem Elektron!



Beobachtungen:

Es gibt eine **minimale Frequenz (f_{\min})**, für welche

- $f < f_{\min} \Rightarrow$ **kein Elektronaustritt**, egal wie groß J ist;
- $f_{\min} \leq f \Rightarrow$ **Elektronen werden ausgelöst**
 - n wächst mit wachsender J
 - v wächst mit wachsender f

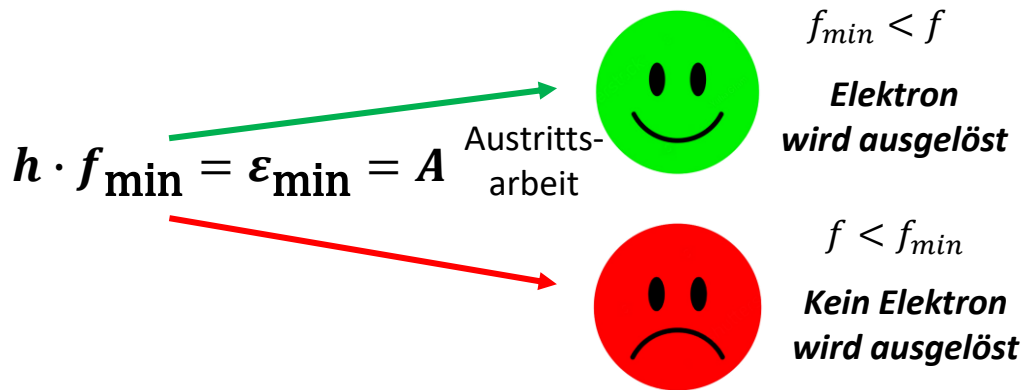
Photon, Photonenenergie

Erklärung (Einstein, 1905)

- **Lichtteilchen = Lichtquanten = Photonen**
- **Photonenenergie (ε):** $\varepsilon = h \cdot f$ plancksche Konstante: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Animation #1: Photoeffekt - Erklärung

Animation #2: Photoeffekt - Versuche

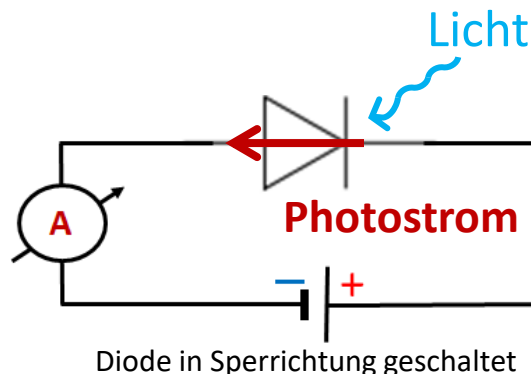


Energieerhaltungssatz:

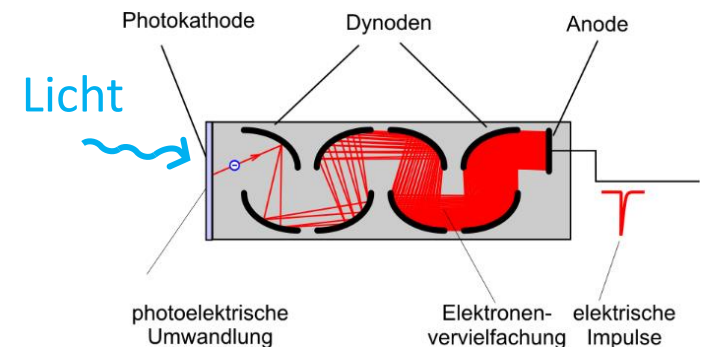
$$\varepsilon = A + \frac{1}{2} \cdot m_{\text{Elektron}} \cdot v_{\text{Elektron}}^2$$

Anwendung: Lichtdetektoren

Photodiode



Photomultiplier (PM) oder Sekundärelektronenvervielfacher (SEV)



Hausaufgaben

Aufgabensammlung

2.31-32, 2.38-39, 2.40, 2.42, 2.45

Feedback