

Elektromagnetische Strahlungen. Licht als Welle und Teilchen.

Balázs Kiss

kissb3@gmail.com



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

30. September 2025.

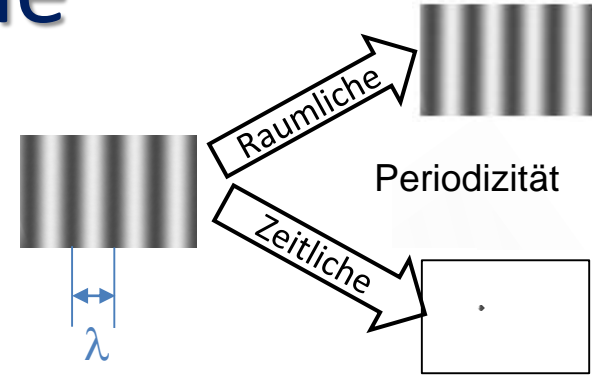
Licht als Welle

Welle: eine sich räumlich ausbreitende periodische Schwingung

Wellenlänge: der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase.

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

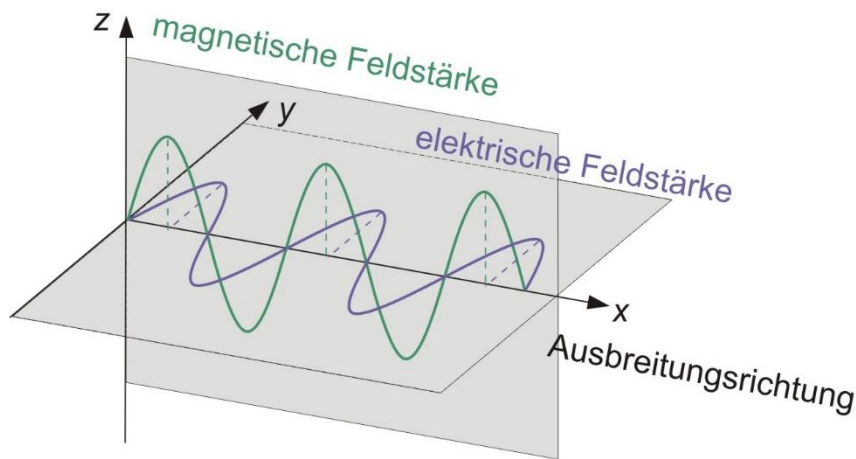
$$c = \lambda \cdot f$$



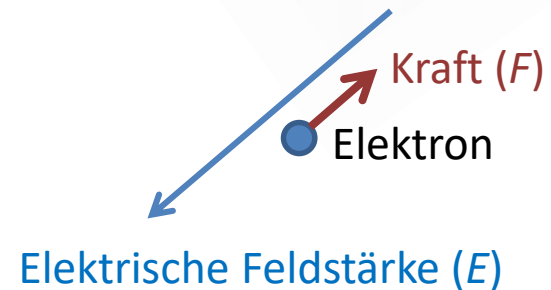
Licht = elektromagnetische Welle

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
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)

3 - 10 eV

1,5 - 3 eV

0,001 - 1 eV

7 Bereiche der EM-Strahlungen

Isotopen-
diagnostik



Röntgen-
diagnostik



UV-Licht
Sonnenbrand
Germizidlampe



IR-Licht
IR-Diagnostik
Wärmetherapie



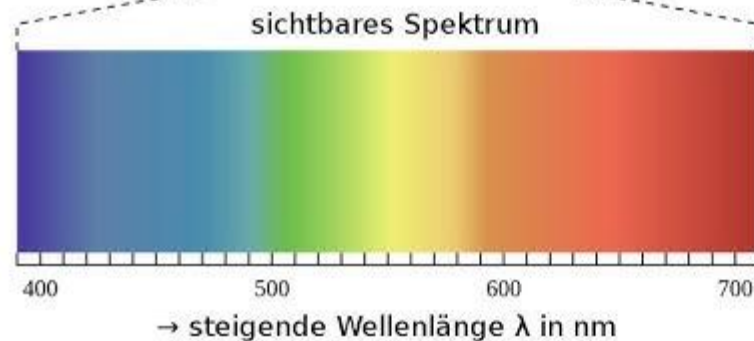
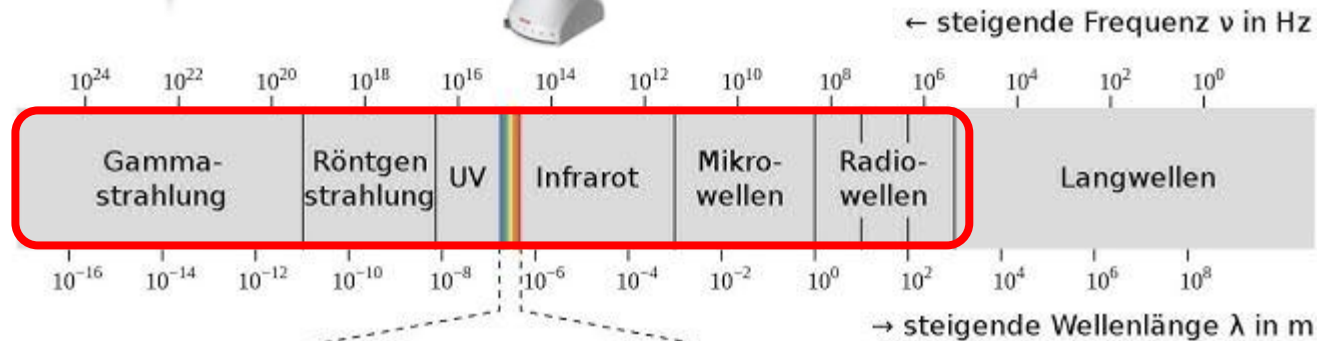
Terahertzwellen
Bodyscanner



Mikrowellen
Kurzwellentherapie



Radiowellen
MRI-Gerät

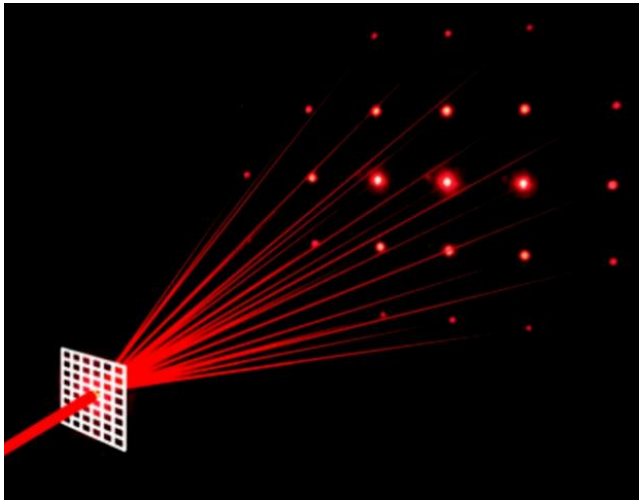


Tageslicht
Sehen

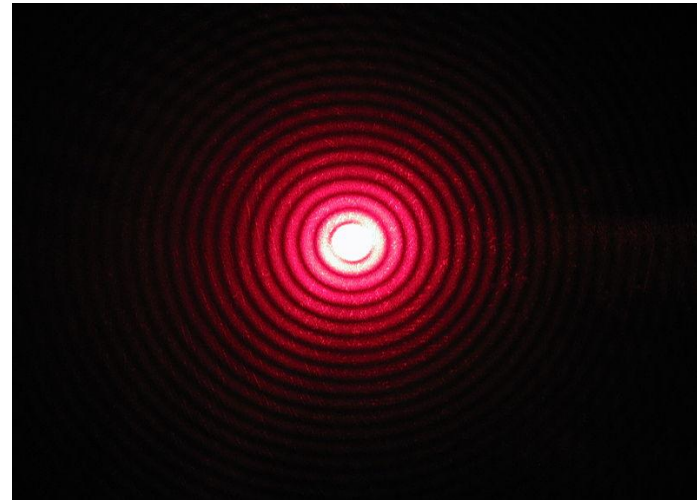


Beugung (Diffraktion) des Lichtes

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**



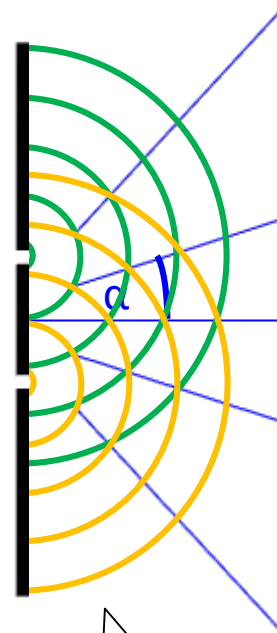
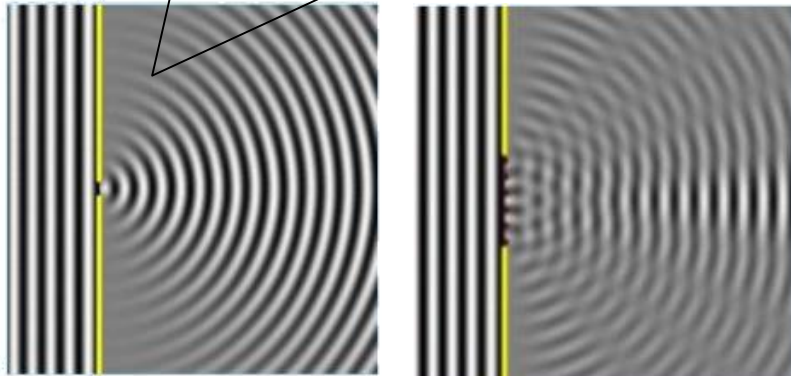
Beugung ist Wellenlängeabhängig!

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

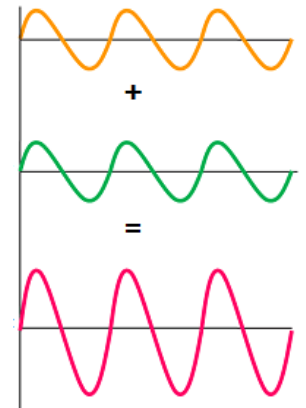
Diffraktion - Grundprinzipie

Huygensches Prinzip:

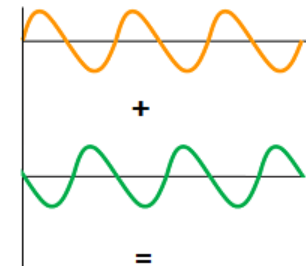
jeder Punkt einer Wellenfront dient als Ausgangspunkt einer neuen Welle



max
min
max
min
max
min
max
min
max
min
max



konstruktive Interferenz:
Verstärkung



destruktive Interferenz:
Auslöschung

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 Phasenbeziehungen.

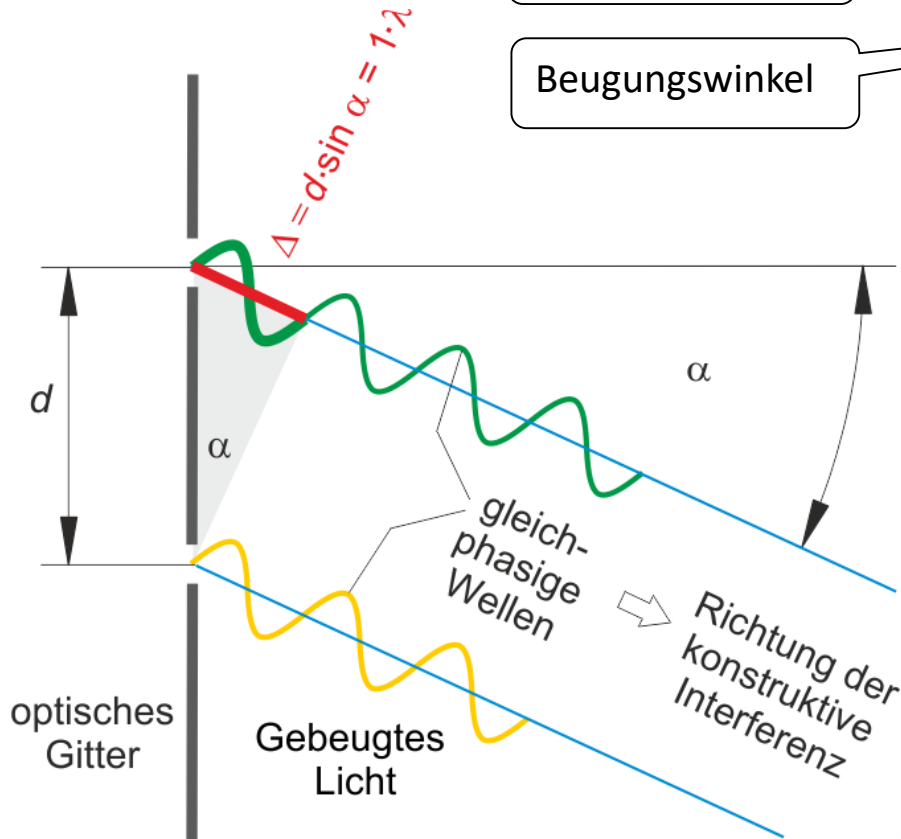
Diffraktionsgleichung

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

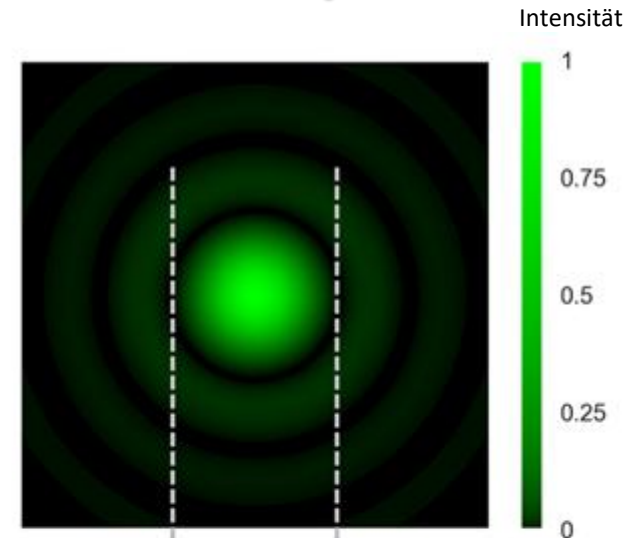
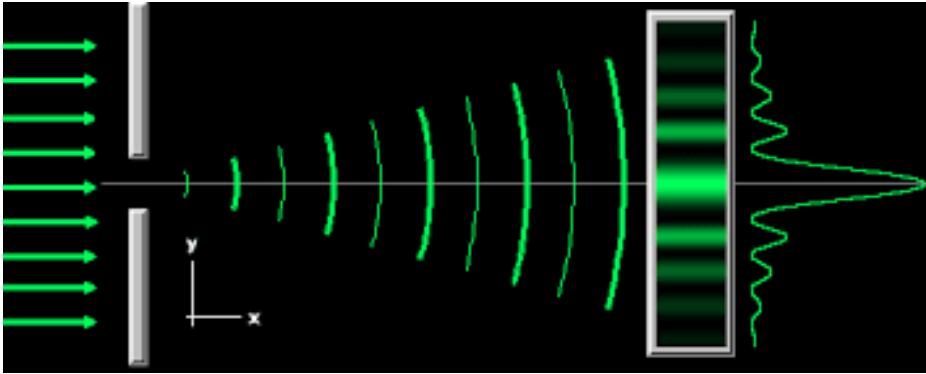
einfallendes Licht
(hier: blau)

Anwendung: **Strukturuntersuchung**

- Lichtmikroskop
- Röntgendiffraktion

Beugung im Lichtmikroskop

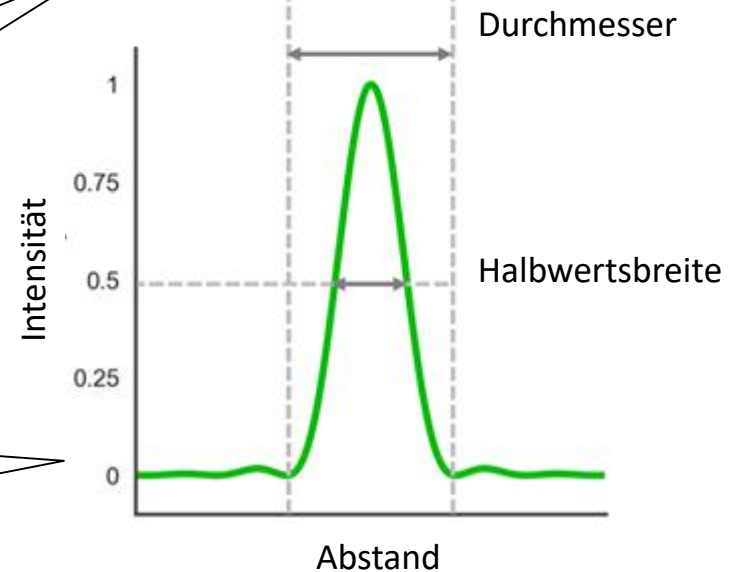
Entstehung der Beugungsscheiben:



Airy-Scheibe:

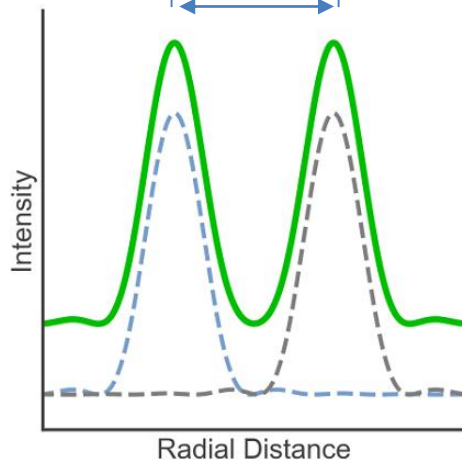
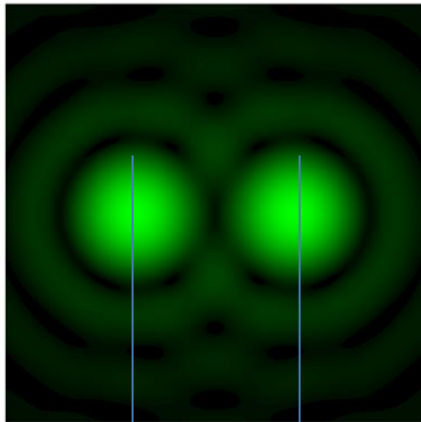
zentrales Maximum, umgeben von Ringen abnehmender Intensität.

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

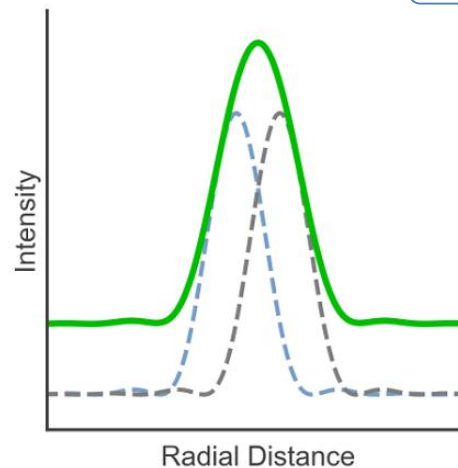
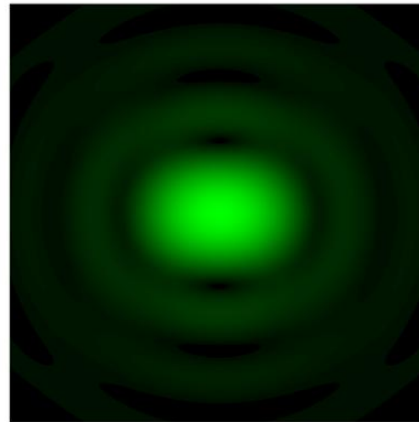


Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops

auflösbar

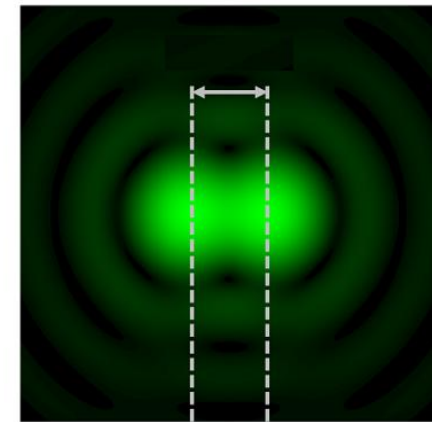


nicht mehr auflösbar



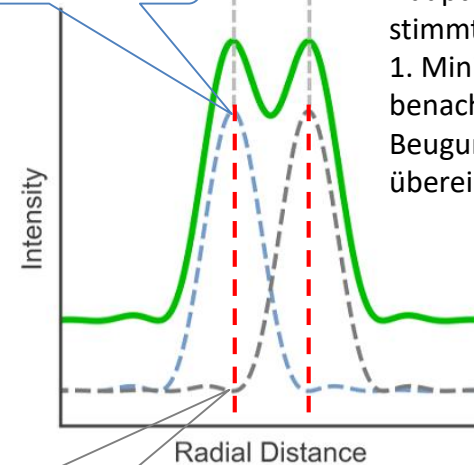
Rayleigh-Grenzfall

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



Hauptmaximum

Hauptmaximum stimmt mit dem 1. Minimum der benachbarten Beugungsscheibe überein



erstes Minimum

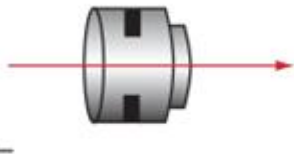
Das Abbe-Prinzip

Problem:

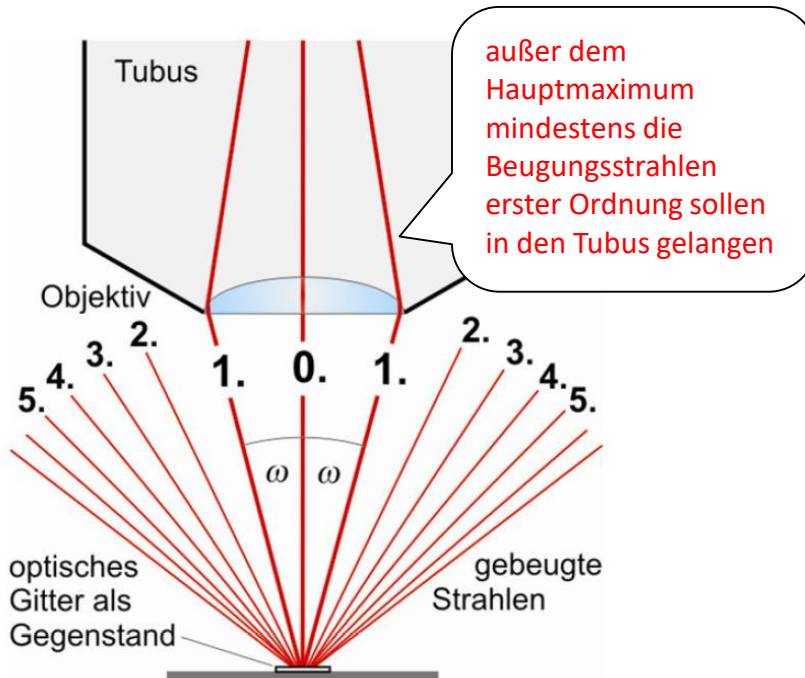
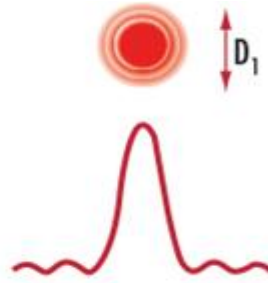
Gegenstand



Linse



Bild

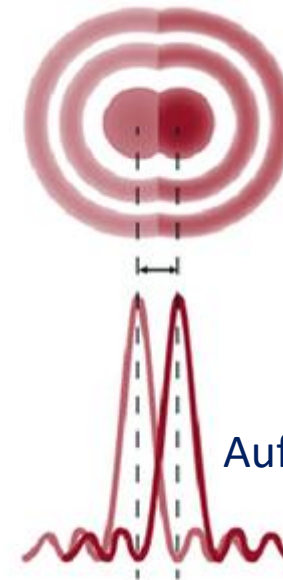


Auflösungsgrenze:

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

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

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

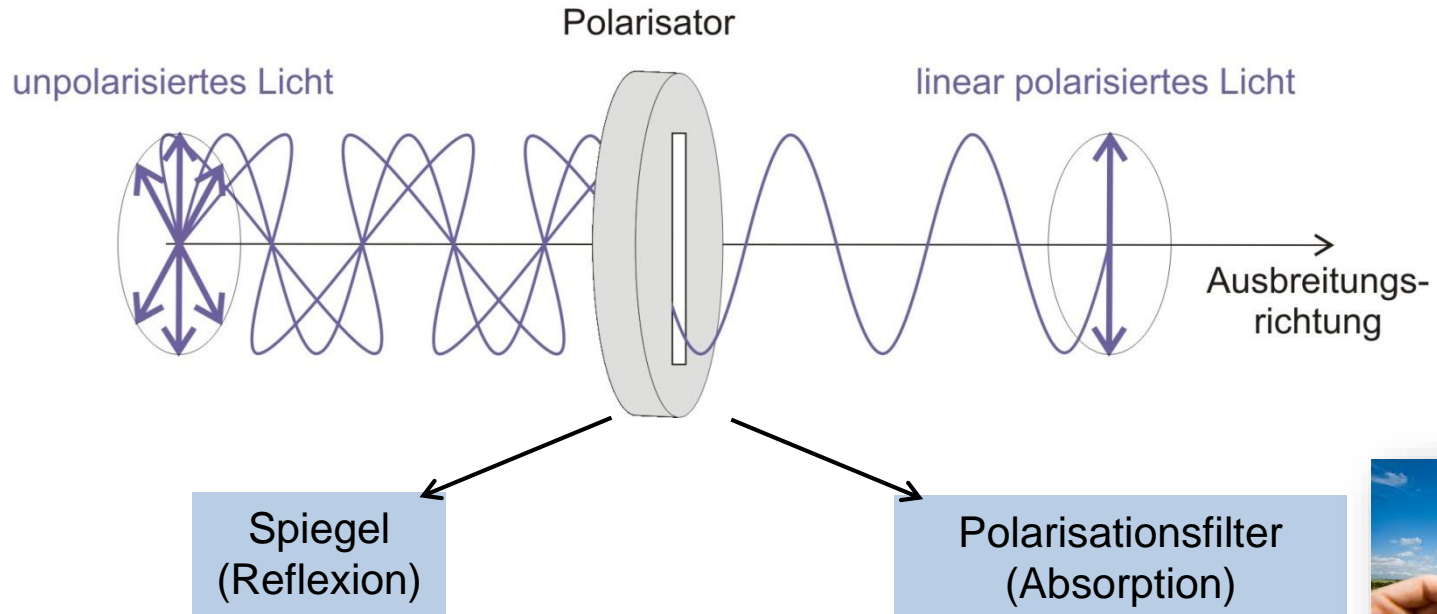


Abbe-Grenze:
 $\delta \sim 200 \text{ nm}$

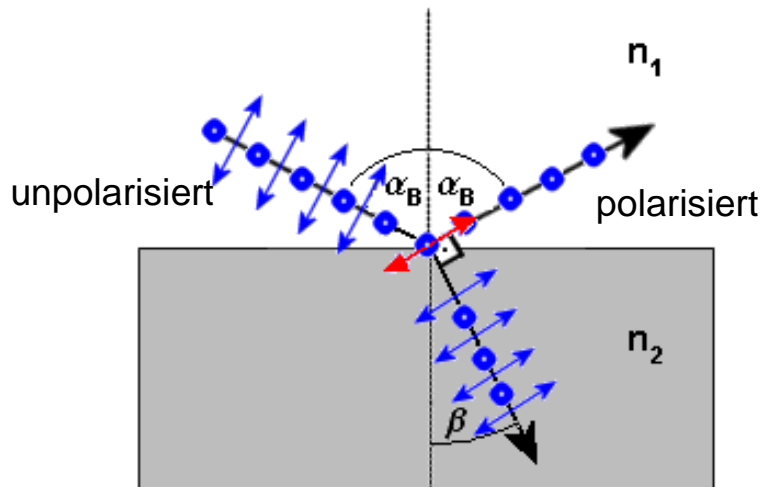
Für eine bessere Auflösung:

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

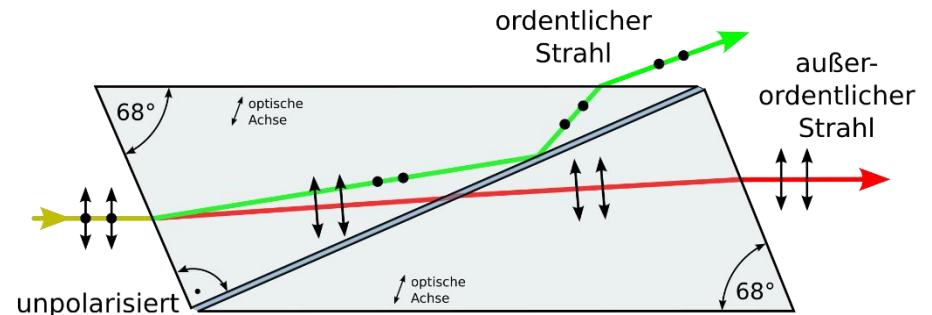
Lineare Polarisation des Lichtes



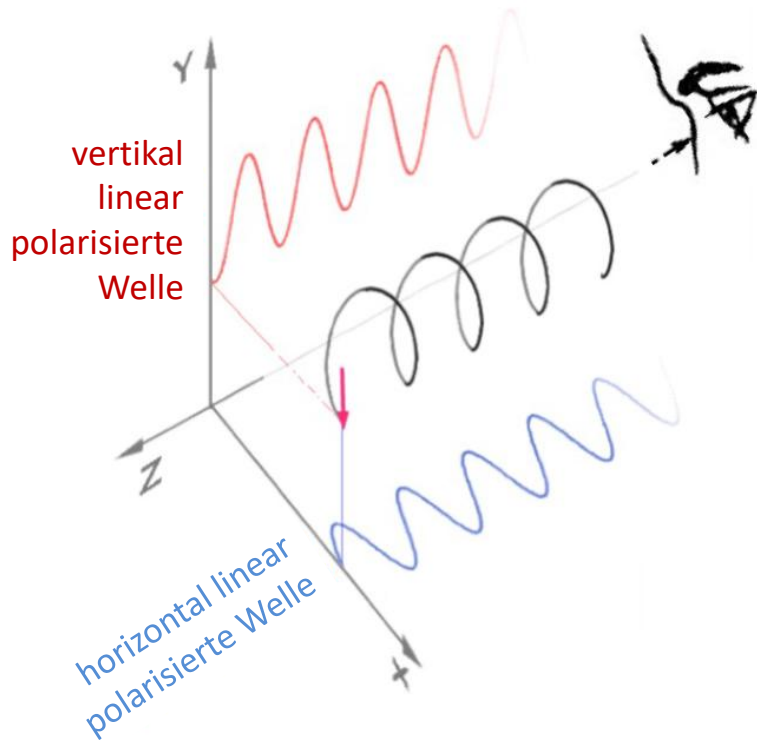
$\alpha_B = \text{Brewster-Winkel: } \text{tg}(\alpha_B) = n_2/n_1$



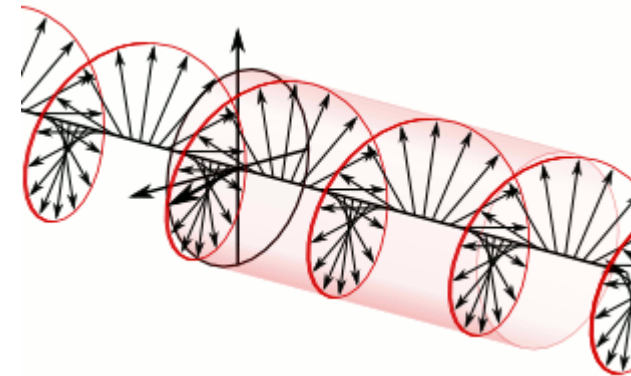
- doppelbrechende Kristalle
- Nicolsches Prisma
- Polymere



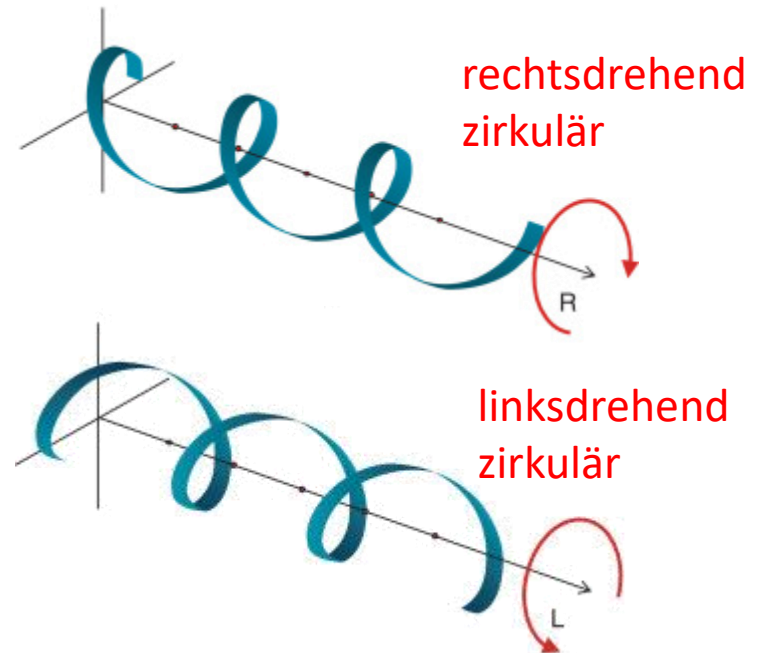
Zirkularpolarisation des Lichtes



- 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



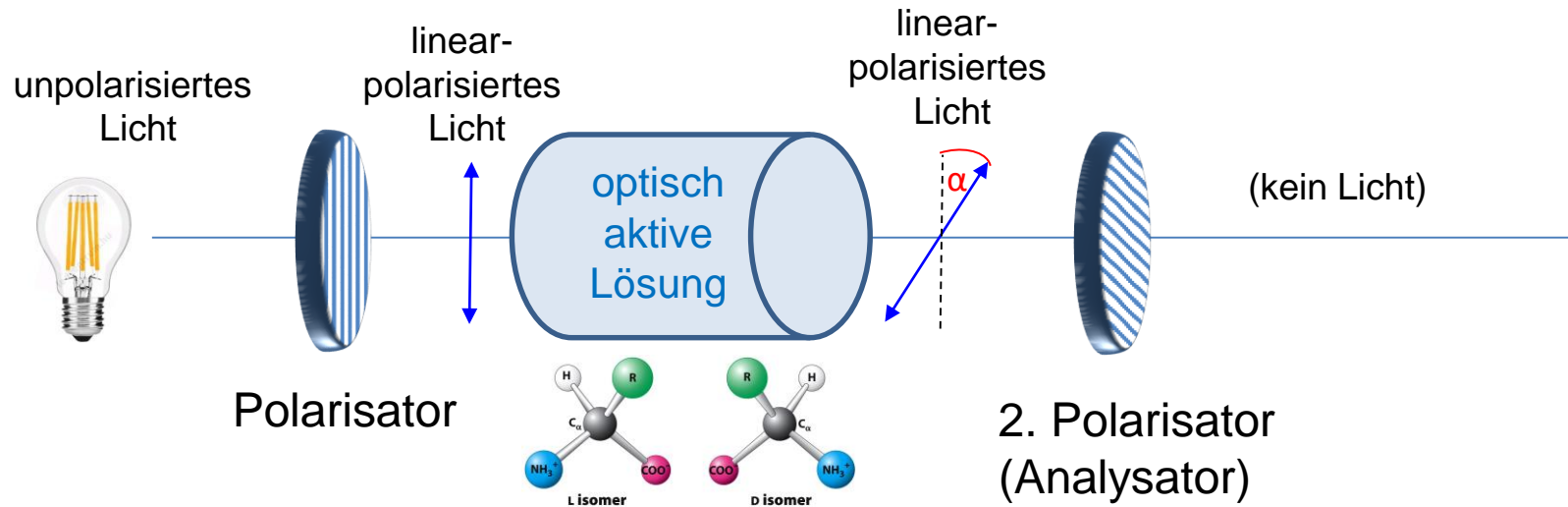
- Der elektrische Feldvektor rotiert in der Frontalebene



Optische Aktivität

Drehung der Schwingungsebene des linear polarisierten Lichtes

Anwendung: **Polarimetrie** - Konzentrationsbestimmung



Biot-Gesetz:

Drehwinkel ($^{\circ}$)

Konzentration (g/cm^3)

Länge der Küvette (dm)

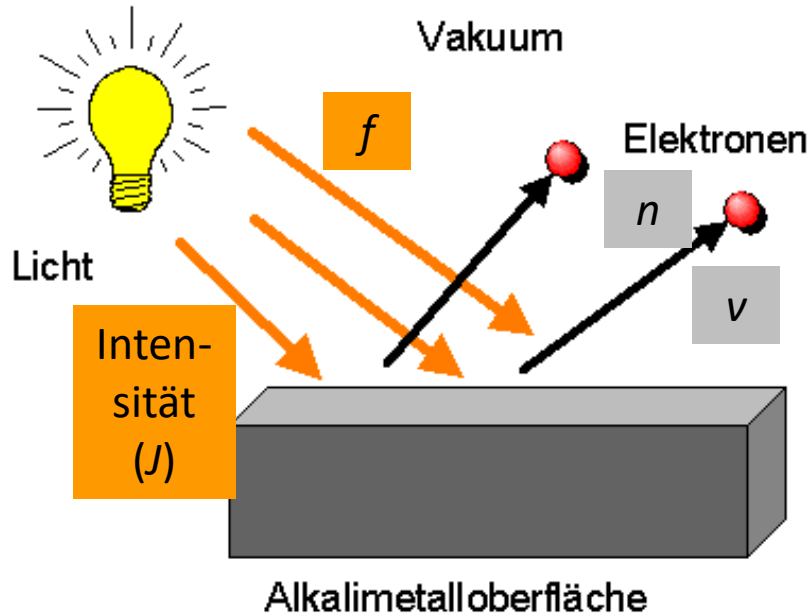
$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

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



Teilchencharakter des Lichtes

Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)



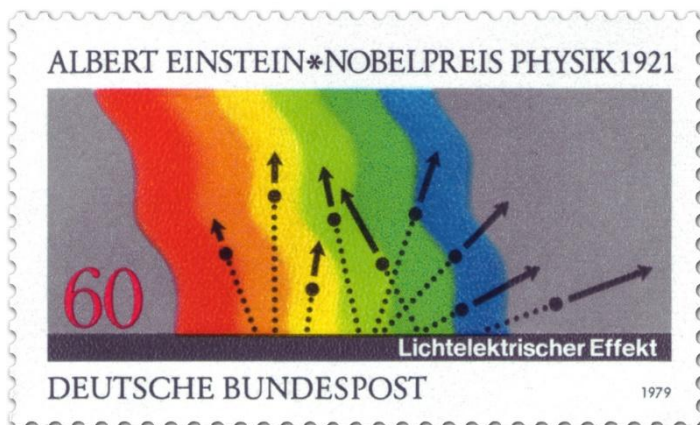
Man variiert:

- 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

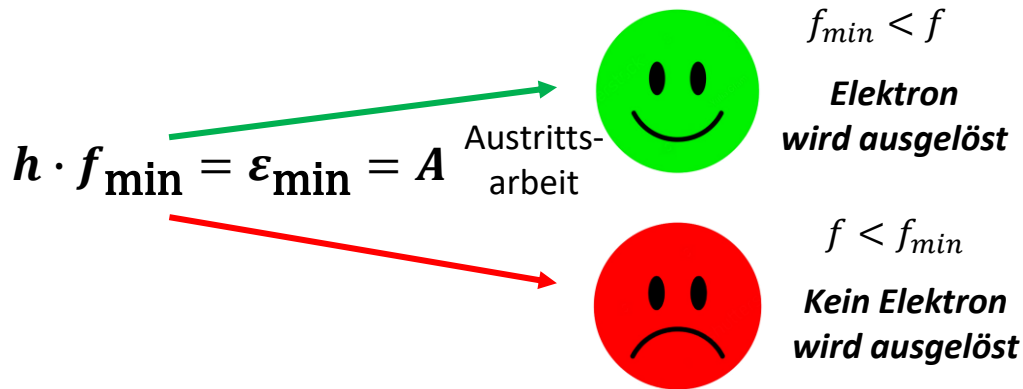
Erklärung (Einstein, 1905)

- **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](#)

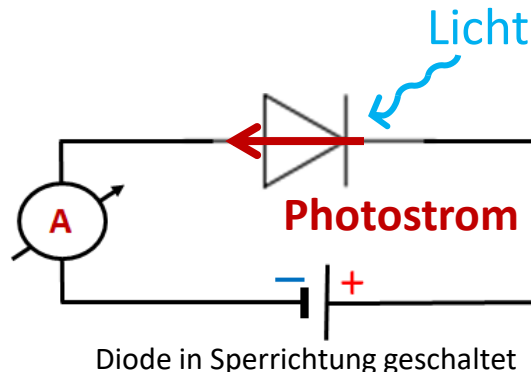


Energieerhaltungssatz:

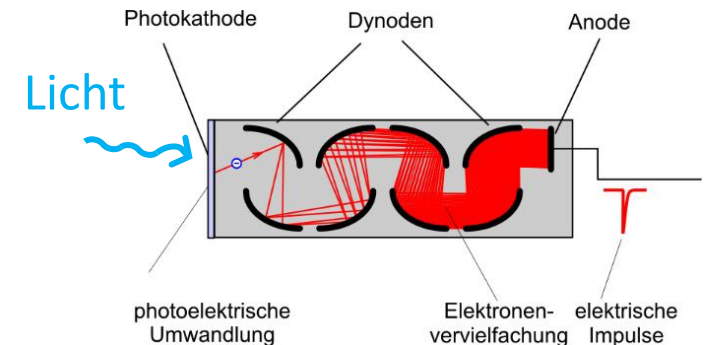
$$\varepsilon = A + \frac{1}{2} \cdot m_{\text{Elektron}} \cdot v_{\text{Elektron}}^2$$

Anwendung: Lichtdetektoren

Photodiode



Photomultiplier (PM) oder Sekundärelektronenvervielfacher (SEV)



Hausaufgaben

Aufgabensammlung

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

Feedback