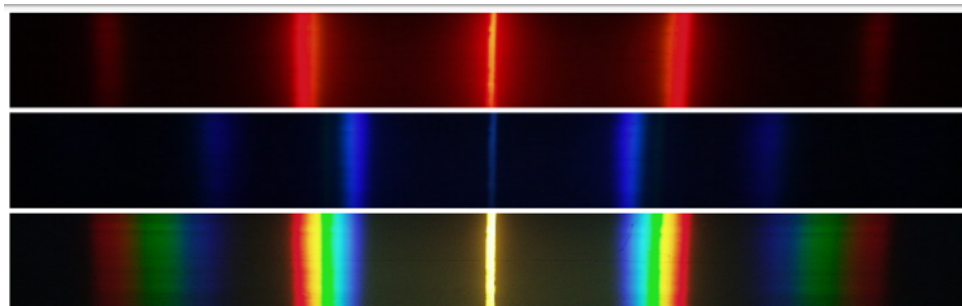


Elektromagnetische Strahlungen.

Licht als Welle: Beugung, Interferenz, Dispersion.

Licht als Teilchenstrahlung



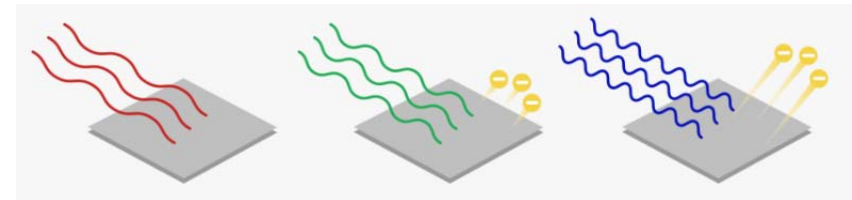
KAD 2023.09.12

Wiederholung

Experimente (z. B. Brechung)
– Licht verhält sich wie eine Welle



Experimente (z. B. Photoeffekt)
– Licht besteht aus Teilchen (Quanten)



Annäherungsmöglichkeiten (Modelle):

- **Wellenmodell** (Wellenoptik)
- **Quantenmodell** (Quantenoptik, Photonentheorie)

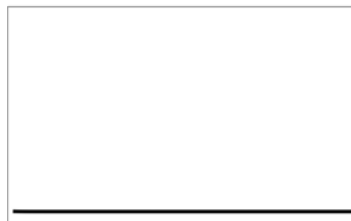
(Welle-Teilchen-Dualismus)

2

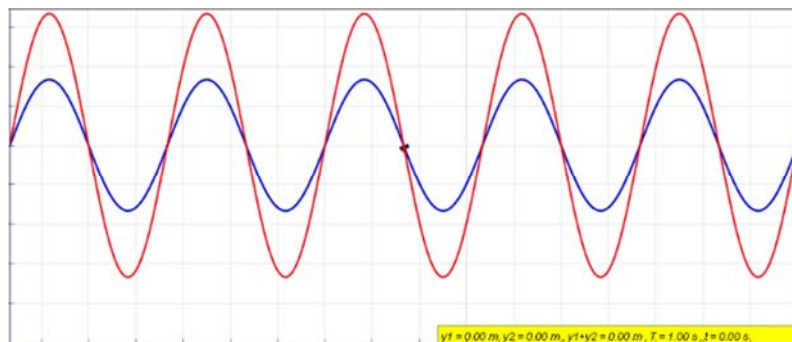
Licht als Welle

Interferenz: Überlagerung von Wellen

Prinzip der ungestörten **Superposition:**



Die Amplitude des resultierenden Wellenfeldes ergibt sich an jeder Stelle zu jeder Zeit durch die **vektorielle Addition** der Einzelamplituden

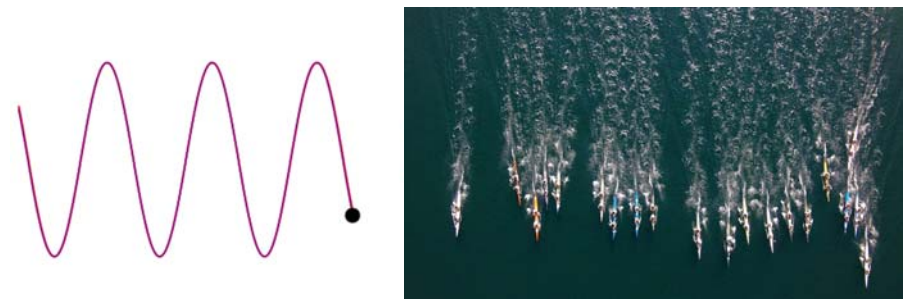


rote Funktion =
blaue Funktion +
grüne Funktion

3

Kohärenz, kohärente Wellen

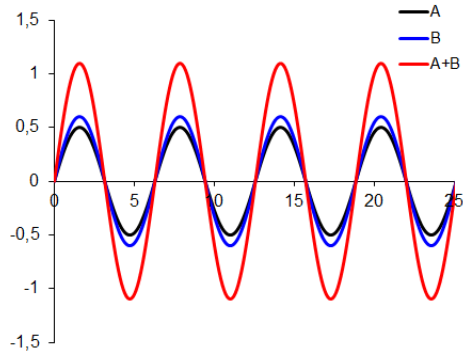
zwei Wellen gleicher Frequenz können als kohärent bezeichnet werden, wenn sie beim Aufeinandertreffen interferenzfähig sind, dh ihre **Phasendifferenz an einem bestimmten Ort zeitlich konstant ist** (oder sich sehr langsam ändert)



4

positive/konstruktive Interferenz

Verstärkung



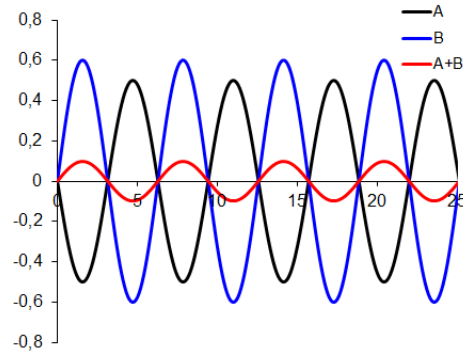
$$\Delta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots =$$

$$= k \cdot \lambda = 2k \cdot (\lambda/2), \text{ wo } k=0, 1, 2, 3, \dots$$

gerade Zahl mal die halbe Wellenlänge

negative/destruktive Interferenz

“Auslöschen”



$$\Delta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots =$$

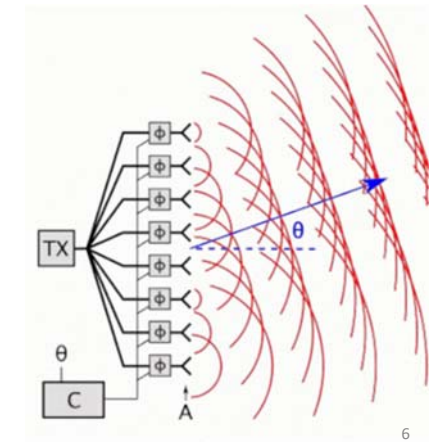
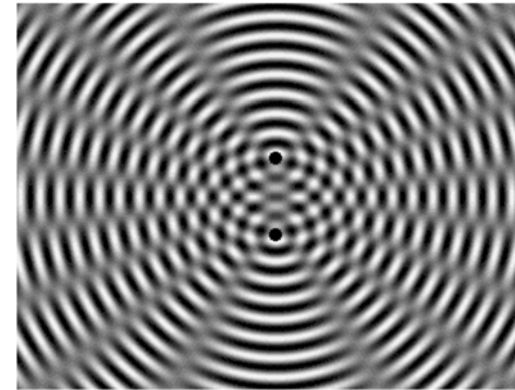
$$= (2k+1) \cdot (\lambda/2), \text{ wo } k=0, 1, 2, 3, \dots$$

ungerade Zahl mal die halbe Wellenlänge

5

Prinzip von Huygens-Fresnel:

Jeder Punkt einer Wellenfront ist der Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle. Die neue Wellenfront der Welle wird durch Überlagerung aller elementarwellen gebildet.

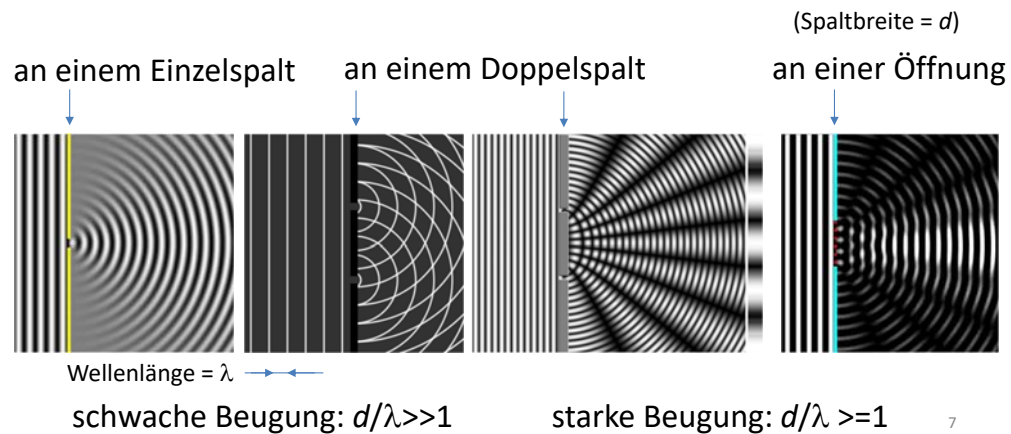


6

Beugung (= Diffraktion)

Ablenkung des Lichtes an Objekten im Wellenfeld, die die komplexe Amplitude örtlich ändern, aufgrund des Huygenschen Prinzips

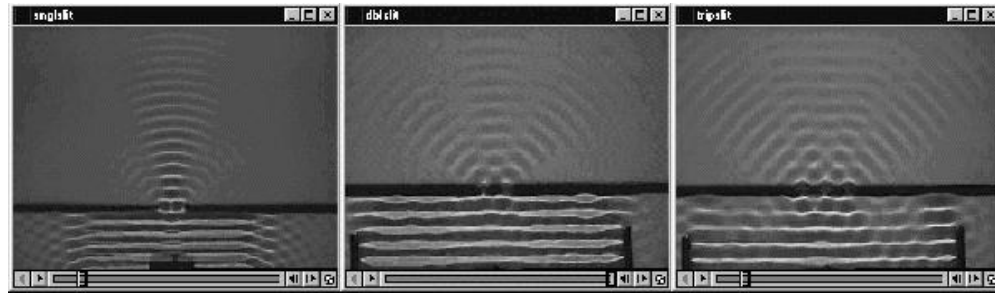
die Beugung oder Diffraktion ist die Ablenkung von Wellen an einem Hindernis



7

Interferenzmuster von Wasserwellen, die von zwei Quellen ausgehen





Beugung am
Einzelspalt

Beugung am
Doppelspalt

Beugung am
Dreierspalt

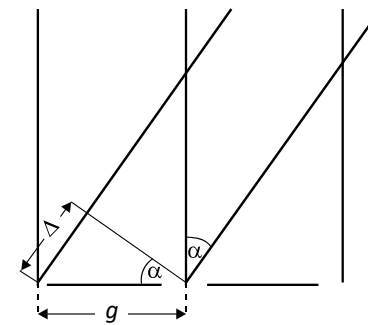
9

Beugung am Gitter (Mehrfachspalt)

Unter einem optischen Gitter versteht man ein Objekt, in dem sich die Bedingungen der Lichtausbreitung periodisch ändern.

Amplitudengitter (Transmissionsgitter)

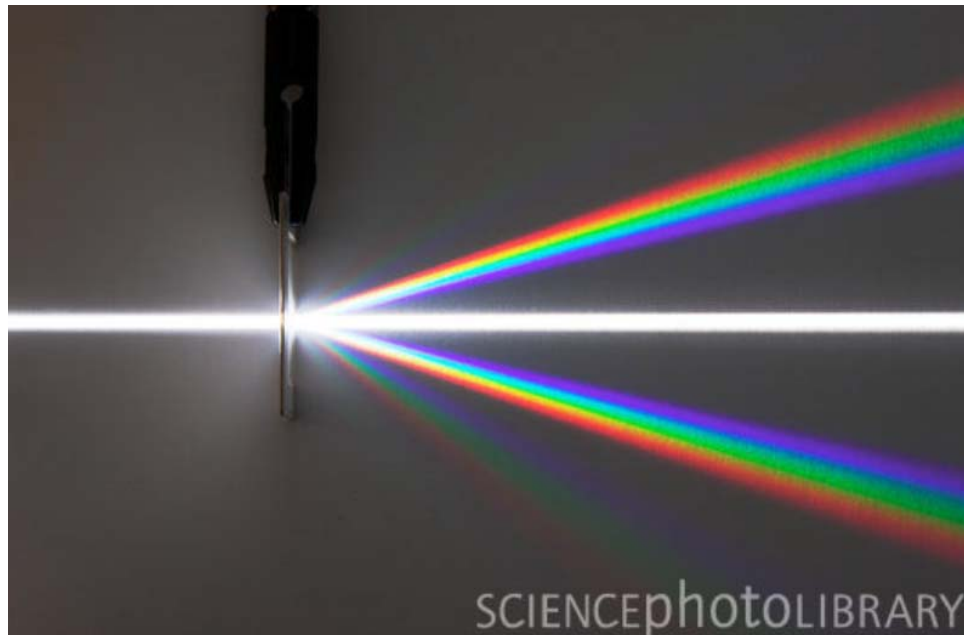
Die Amplitude des Lichts ändert sich periodisch und die Periode (Gitterkonstante) liegt in der Größenordnung der Wellenlänge.



$$\Delta = g \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$$

Die zu den Werten $k = 0, 1, 2, \dots$ gehörenden Maxima werden als **Diffractionsbilder** oder **Seitenmaxima** nullter, erster, zweiter ... Ordnung bezeichnet, das von nullter Ordnung wird auch **Hauptmaximum** genannt. Das gesamte Beugungsbild ist symmetrisch zum Hauptmaximum.

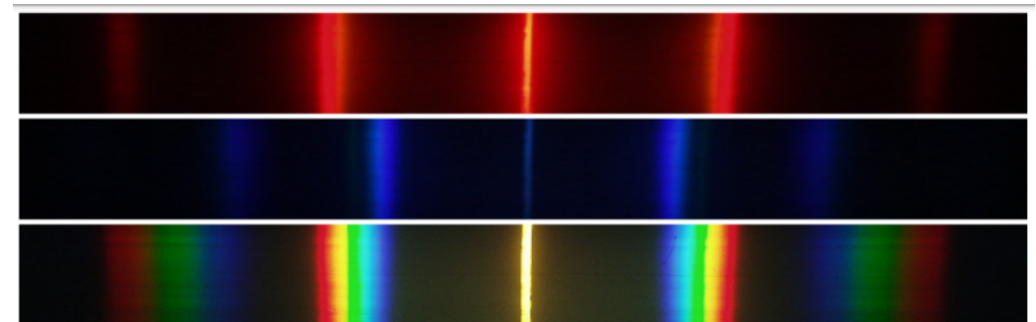
10



11

Seitenmaxima
erster Ordnung

(Seiten)maximum
nullter Ordnung

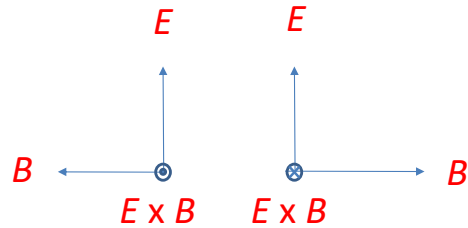


Hauptmaximum

Seitenmaxima
zweiter Ordnung

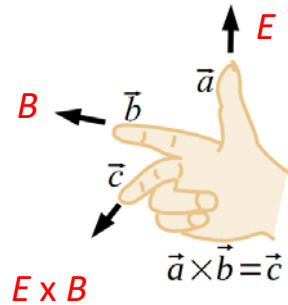
12

elektrischer (E) und magnetischer (B) Feldvektor schwingen immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung



Ausbreitungsrichtung
des Lichtes
(es kommt) (es geht)

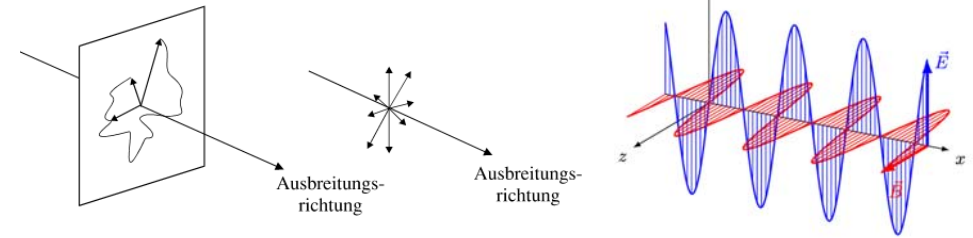
Rechte-Hand-Regel



Das **Kreuzprodukt** zweier Vektoren **a** und **b** ergibt wieder einen Vektor, der senkrecht zu **a** und zu **b** steht.

13

Die Transversalität der Lichtwelle



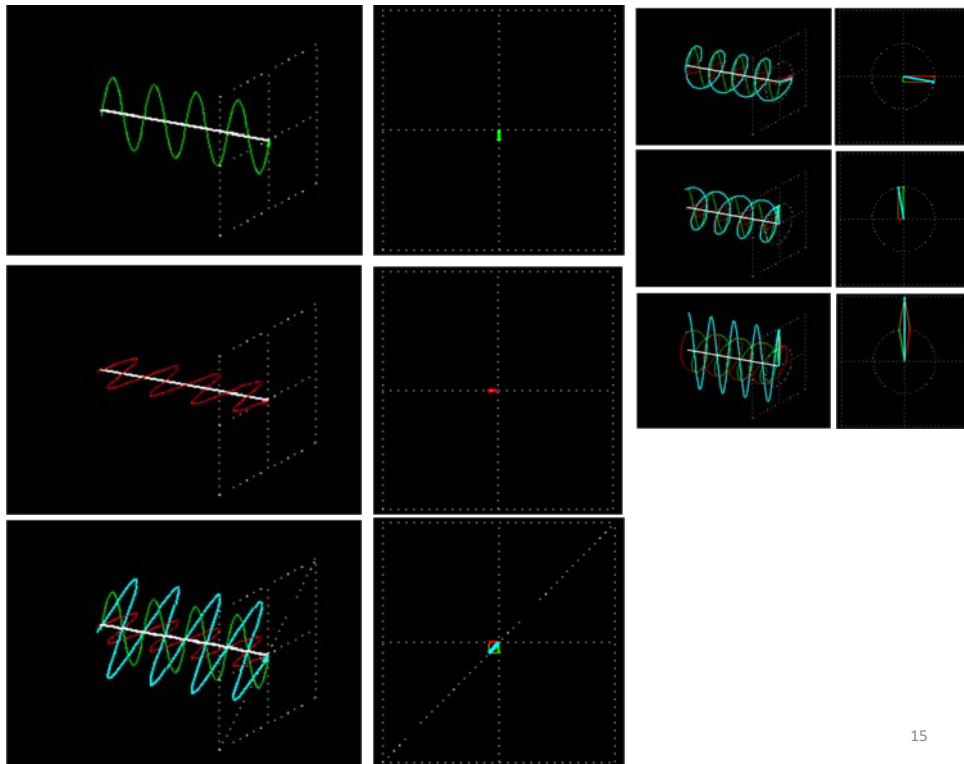
normales
(unpolarisiertes) Licht:

der elektrische Feldvektor
ändert seine Orientierung
und Länge **regellos**

polarisiertes Licht:

der elektrische Feldvektor
ändert seine Orientierung
und Länge **regelmässig**

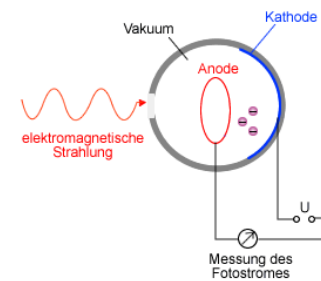
14



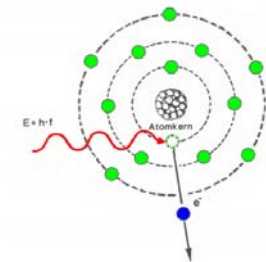
15

Licht als Teilchenstrahlung

Der **Photoeffekt**: die auf die Materie einfallende Strahlung löst ein Elektron aus. Es gibt eine Grenzfrequenz, welche die Strahlung haben muss, um das Atom gerade zu ionisieren.



(äusserer Photoeffekt)



Interpretation: Teilchenstrahlung, Energiequantum: Photon

16

$$\varepsilon = hf = h \frac{c}{\lambda} = A + E_{kin} = A + \frac{1}{2} mv^2$$

Einstensche Gleichung

ε : (Quanten-)Energie des Photons (Photonenenergie)

f : Frequenz des Photons

λ : Wellenlänge des Photons

A : Austrittsarbeit (Ionisationsenergie),

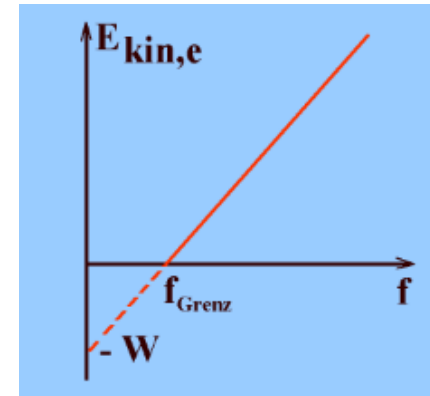
h : Plancksche Konstante

$E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2$: kinetische Energie des ausgelösten Elektrons

$$hf_{Gr} = A, \quad f_{Gr} = \frac{A}{h} \quad f_{Gr}: \text{Grenzfrequenz}$$

17

Graphische Darstellung der Grenzfrequenz



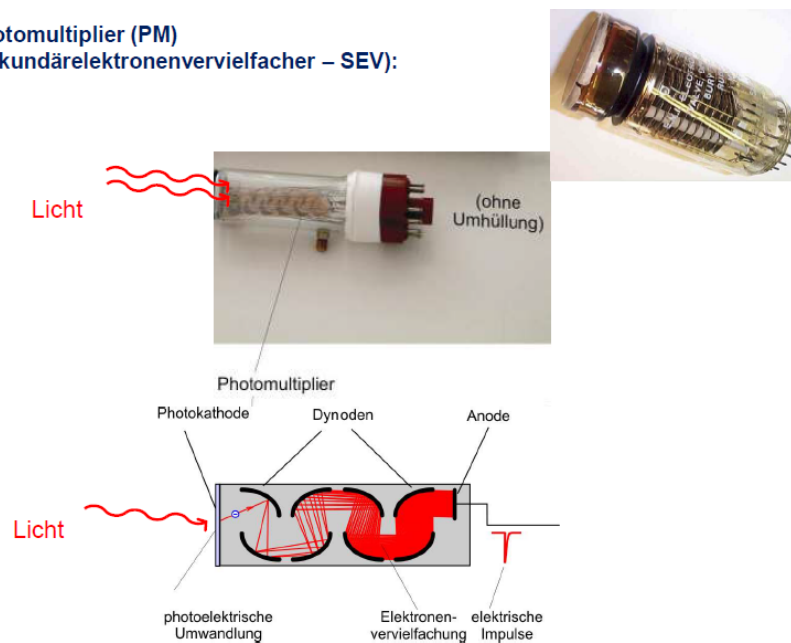
Die maximale kinetische Energie der ausgetretenen Elektronen zeigt eine lineare Abhängigkeit von der Frequenz des eingestrahlen Lichtes.

18

Anwendung des Photoeffekts

Photomultiplier (PM)

(Sekundärelektronenvervielfacher – SEV):



19

Rechenaufgabe:

Photonenenergie aus der Wellenlänge des Lichtes

$$E = h \times \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = 400 \text{ nm}$$

$$E = 6.6 \times 10^{-34} \text{ Js} \times \frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4 \times 10^{-7} \text{ m}} = 4.95 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E = \frac{4.95 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19}} = 3.1 \text{ eV}$$

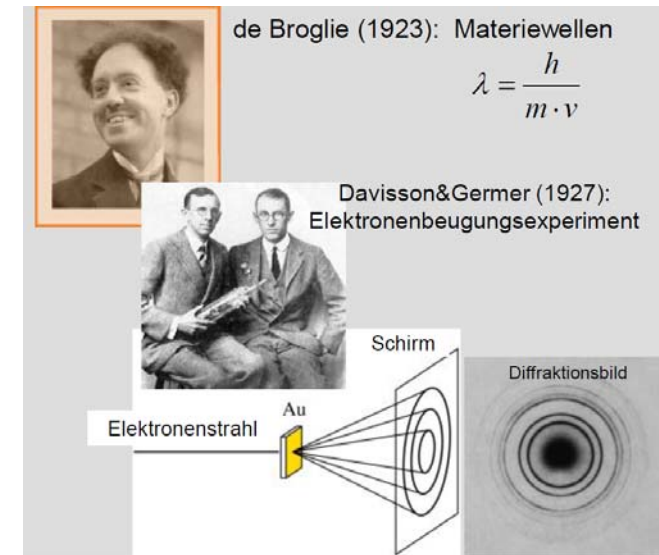
$$E_{VIS} = 1.6 - 3.1 \text{ eV} \\ 800 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$$

20

Energie	Frequenz	Wellenlänge	Bezeichnung	Emissionsquelle
	30 Hz	10^4 km	niederfrequente Wellen	Generatoren der Industrie
	300 Hz	10^3 km		
	3 kHz	10^2 km	Langwellen	elektrische Generatoren
	30 kHz	10 km		
	300 kHz	1 km		
	3 MHz	100 m		
	30 MHz	10 m	Kurzwellen	
	300 MHz	1 m	Ultrakurzwellen	
	3 GHz	100 mm	Dezimeterwellen	
	30 GHz	10 mm	Zentimeterwellen	
	300 GHz	1 mm		
0.01 eV	3 THz	100 μ m	Infrarotstrahlen	Strahlung heisser Körper
0.1 eV	30 THz	10 μ m		
1 eV	300 THz	1 μ m		
10 eV	3 PHz	100 nm	sichtbares Licht	Energieumsatz in der Atomhülle
100 eV	30 PHz	10 nm	Ultraviolettstrahlung	
1 keV	300 PHz	1 nm		
10 keV	3 EHz	100 pm	Röntgenstrahlen	Abbremsung von Elektronen im Kernfeld
100 keV	30 EHz	10 pm		
1 MeV	300 EHz	1 pm		
10 MeV	3×10^{21} Hz	100 fm	Gammastrahlen	Energieumsatz im Atomkern
	30×10^{21} Hz	10 fm		
	300×10^{21} Hz	1 fm		
	3×10^{24} Hz	100 am	kosmische Strahlung	Elementarteilchen und deren Zerfallsprodukte
	30×10^{24} Hz	10 am		

21

Die **de-Broglie-Wellenlänge** ist eine Übertragung von Eigenschaften von Photonen auf Objekte mit Ruhemasse, z.B. Elektronen



22

was ist die de Broglie-Wellenlänge eines gehenden Mannes?

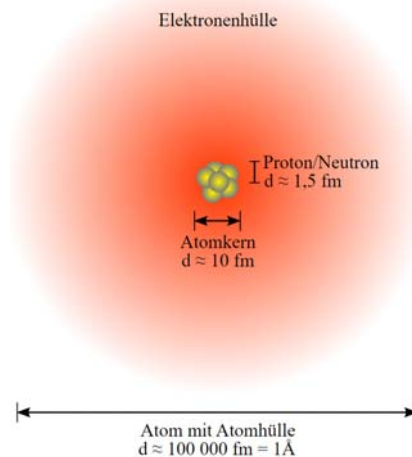
$m = 80 \text{ kg}$, $v = 5 \text{ km/h}$

$\lambda = h / (m \cdot v) = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} / (80 \text{ kg} \cdot 5000 \text{ m} / 3600 \text{ s}) = 6 \cdot 10^{-36} \text{ m}$

für die Diffraktion solcher Wellen
wären „Öffnungen“ dieser
Größenordnung notwendig

$$6 \cdot 10^{-36} \text{ m} = 0,4 \cdot 10^{-20} \cdot 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

d_{Proton}



23

Interferenz, Superposition

Kohärenz

konstruktive, destruktive Interferenz

Huygens-Fresnel Prinzip

Beugung (Diffraktion)

Einzelspalt, Doppelspalt, Öffnung, Gitter, Haupt-, Nebenmaxima

Recht-Hand-Regel

E und B

Transversalität des Lichtes

Photoeffekt

PM (SEV)

De Broglie Wellenlänge

24