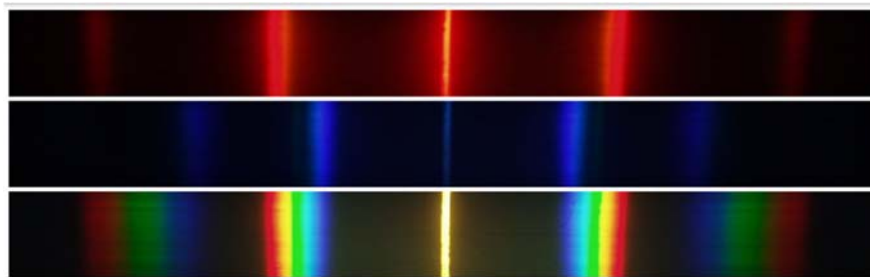


# Elektromagnetische Strahlungen. Licht als Welle: Beugung, Interferenz, Dispersion. Licht als Teilchenstrahlung



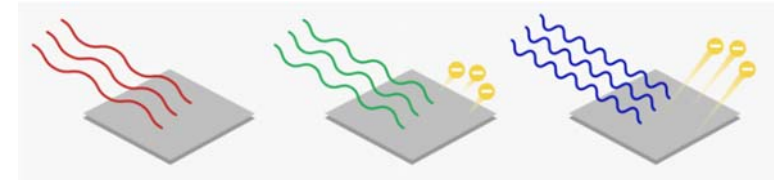
KAD 2021.09.14

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)

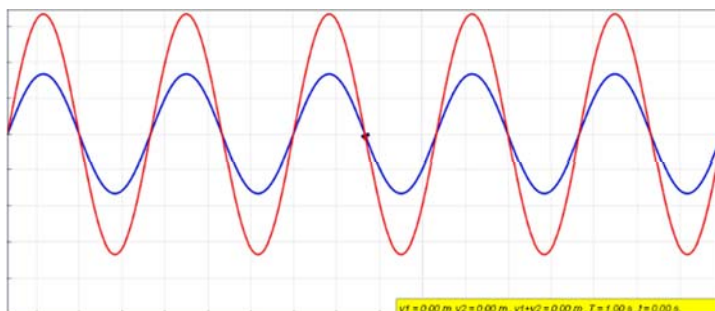
2

## Licht als Welle

**Interferenz:** Überlagerung von Wellen

Prinzip der ungestörten **Superposition:**

Die Ampiltude 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

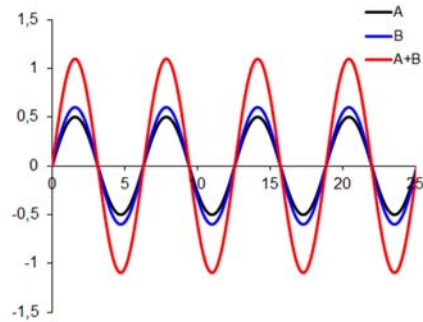
zwei Wellen gleicher Frequenz können als kohärent bezeichnet werden, wenn sie beim Aufeinandertreffen interferenzfähig sind, dh ihre **Phasendifferenz an einem bestimmten Ort zeitlich konstant ist** (oder sich sehr langsam ändert)



4

### positive/konstruktive Interferenz

Verstärkung



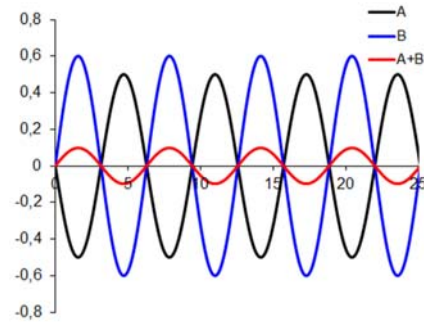
$$\Delta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots =$$

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

gerade Zahl mal die halbe Wellenlänge

### negative/destruktive Interferenz

“Auslöschen”



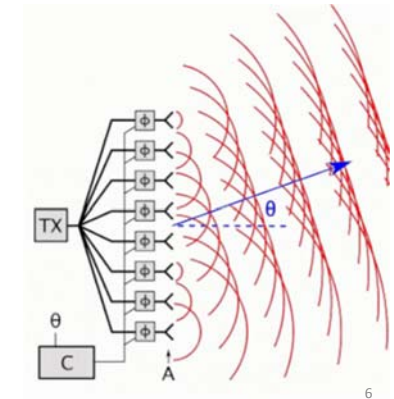
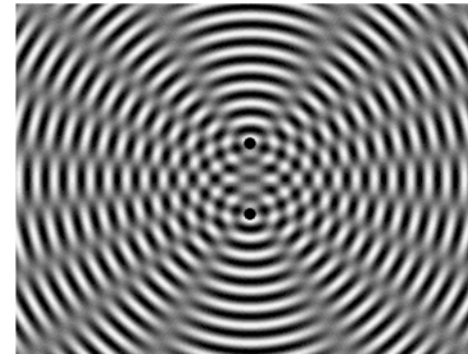
$$\Delta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots =$$

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

ungerade Zahl mal die halbe Wellenlänge

### 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.

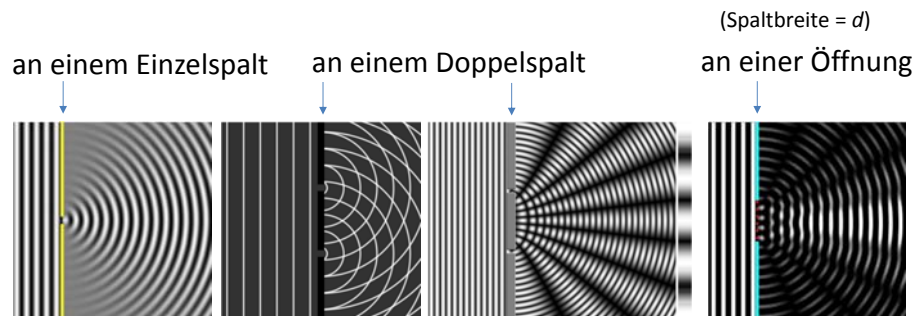


6

### 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



Wellenlänge =  $\lambda$

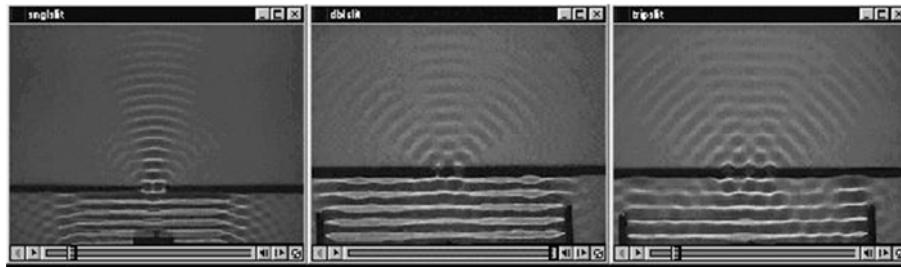
schwache Beugung:  $d/\lambda \gg 1$

starke Beugung:  $d/\lambda \approx 1$

7

### Interferenzmuster von Wasserwellen, die von zwei Quellen ausgehen





Beugung am  
Einzelspalt

Beugung am  
Doppelspalt

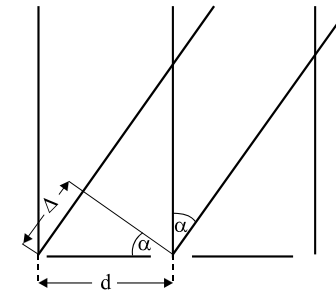
Beugung am  
Dreierspalt

9

## Beugung am Gitter

### Amplitudengitter (Transmissionsgitter)

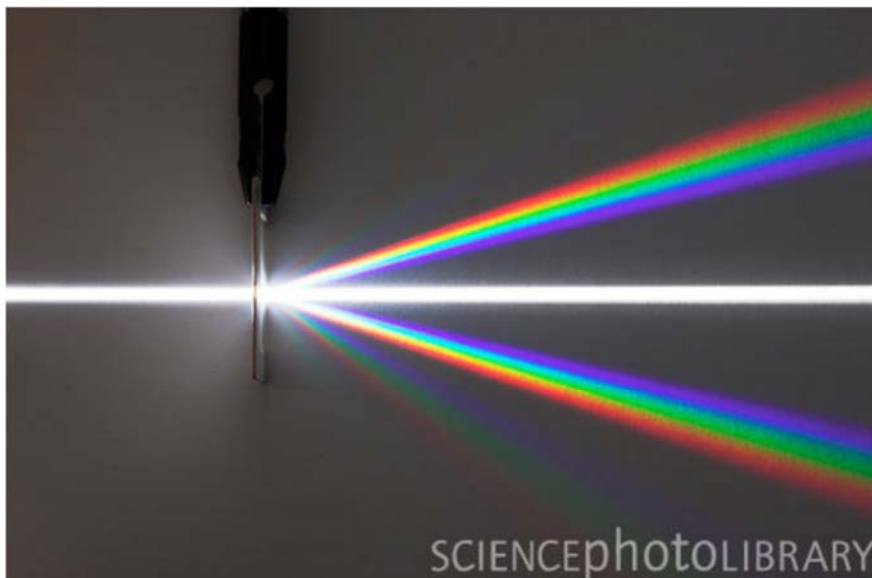
Unter einem optischen Gitter versteht man ein Objekt, in dem sich die Bedingungen der Lichtausbreitung periodisch ändern.



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

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

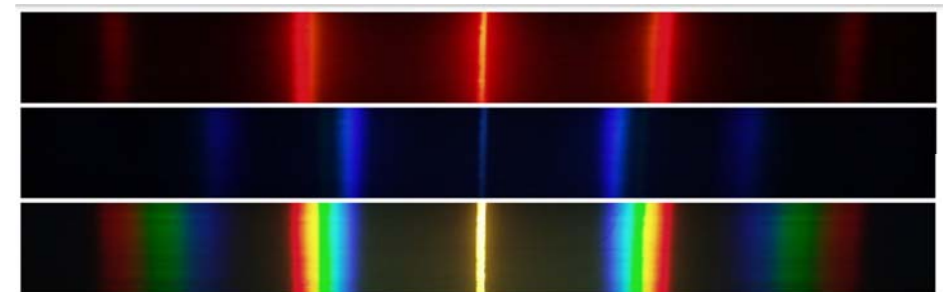
10



11

Seitenmaxima  
erster Ordnung

(Seiten)maximum  
nullter Ordnung

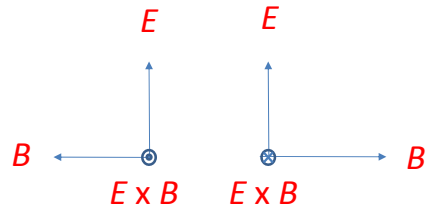


Hauptmaximum

Seitenmaxima  
zweiter Ordnung

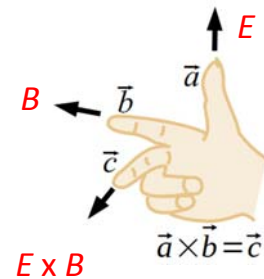
12

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



Ausbreitungsrichtung  
des Lichtes  
(es kommt) (es geht)

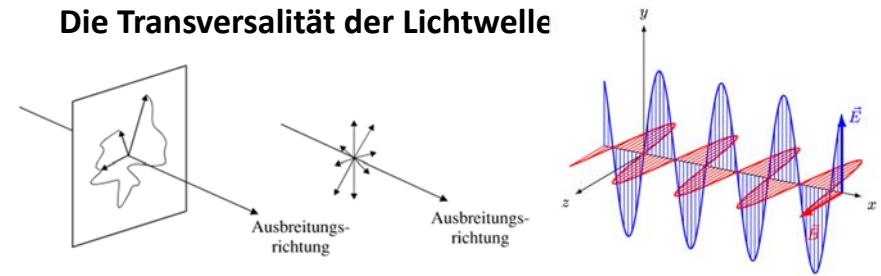
Rechte-Hand-Regel



Das **Kreuzprodukt** zweier Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  ergibt wieder einen Vektor, der senkrecht zu  $\vec{a}$  und zu  $\vec{b}$  steht.

13

## Die Transversalität der Lichtwelle



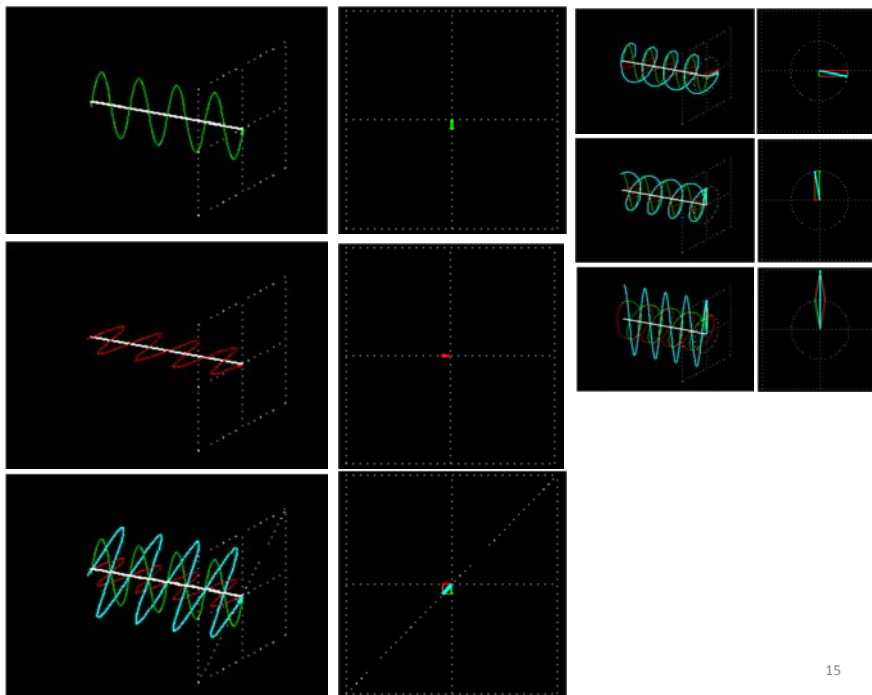
normales  
**(unpolarisiertes) Licht:**

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

**polarisiertes Licht:**

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

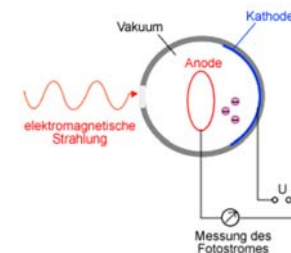
14



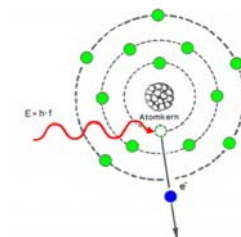
15

## 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**

$\varepsilon$ : (Quanten-)Energie des Photons (Photonenenergie)

$f$ : Frequenz des Photons

$\lambda$ : Wellenlänge des Photons

$A$ : Austrittsarbeit (Ionisationsenergie),

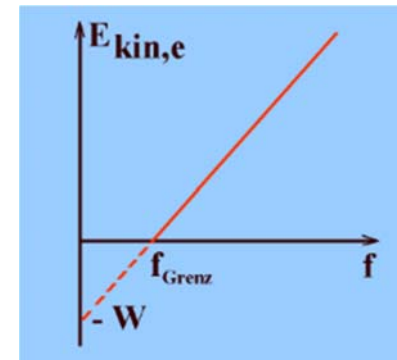
$h$ : Plancksche Konstante

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

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

17

## Graphische Darstellung der Grenzfrequenz

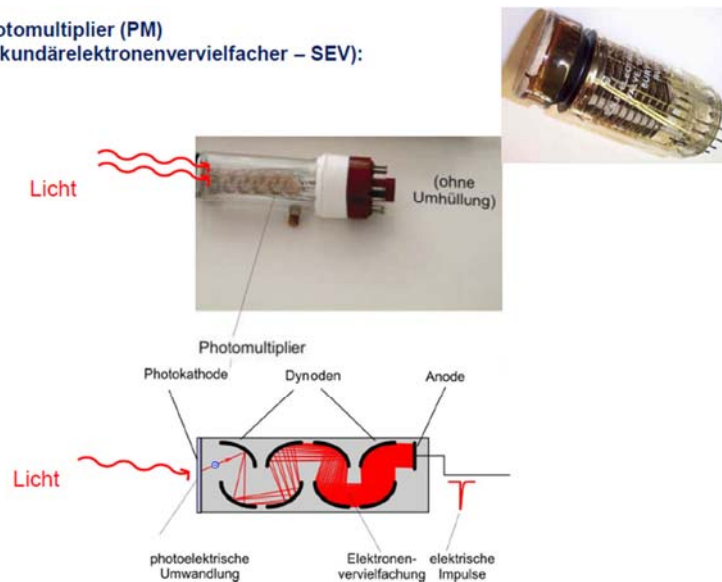


Die maximale kinetische Energie der ausgetretenen Elektronen zeigt eine lineare Abhängigkeit von der Frequenz des eingestrahlen Lichtes.

18

## Anwendung des Photoeffekts

**Photomultiplier (PM)**  
(Sekundärelektronenvervielfacher – SEV):



19

Rechenaufgabe:  
Photonenenergie aus der Wellenlänge des Lichtes

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

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

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

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

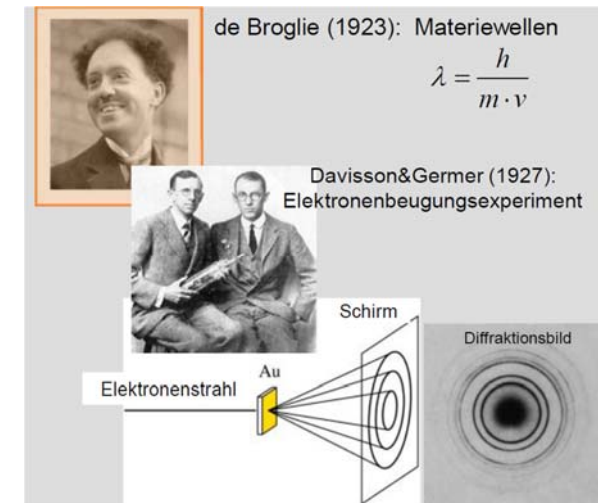
$$E_{VIS} = 1.6 - 3.1 \text{ eV} \\ 800 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$$

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		
	30 kHz	10 km	Langwellen	
	300 kHz	1 km		
	3 MHz	100 m	Mittelwellen	
	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 $\mu$ m	Infrarotstrahlen	Strahlung heisser Körper
0.1 eV	30 THz	10 $\mu$ m		
1 eV	300 THz	1 $\mu$ 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	$3 \times 10^{21}$ Hz	100 fm	Gammastrahlen	Energieumsatz im Atomkern
	$30 \times 10^{21}$ Hz	10 fm		
	$300 \times 10^{21}$ Hz	1 fm		
	$3 \times 10^{24}$ Hz	100 am	kosmische Strahlung	Elementarteilchen und deren Zerfallsprodukte
	$30 \times 10^{24}$ Hz	10 am		

21

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



22

## Vorlesung 1

Energie, Leistung, Intensität  
Punkt-strahler, Linien-, Flächen-  
Häufigkeitsverteilung, absolute u. relative  
Spektrum, kont., Banden-, Linien-  
EM, mechanische Welle, Teilchenstrahlungen  
Kernstrahlungen, ionisierende/nicht- Str.  
Wellenmodell, Quantenmodell  
Schwingungs-, Wellen-bewegung  
Amplitude, Phase; Amplitudenobjekt, Phasenobjekt;  
Amplitudengitter, Phasengitter  
longitudinale Welle, transversale Welle

23

## Vorlesung 2

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