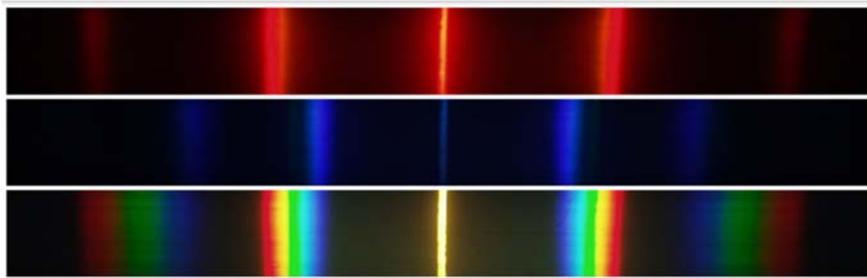


# Elektromagnetische Strahlungen. Licht als Welle: Beugung, Interferenz, Dispersion. Licht als Teilchenstrahlung



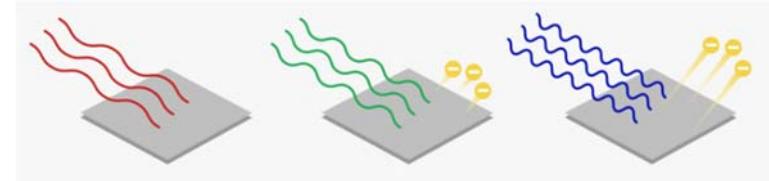
KAD 2021.09.14

## 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)

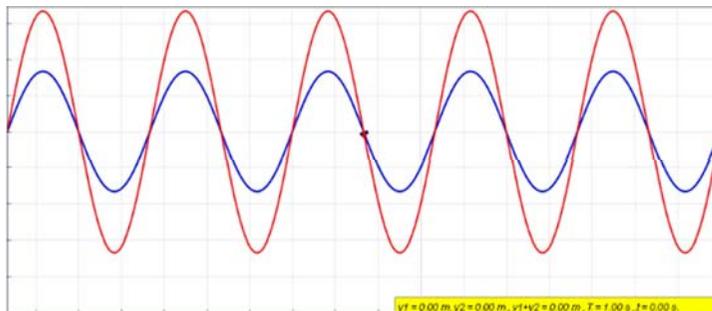
2

## Licht als Welle

**Interferenz:** Überlagerung von Wellen

Prinzip der ungestörten **Superposition:**

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

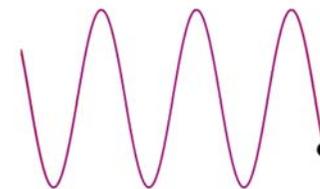


rote Funktion =  
blaue Funktion +  
grüne Funktion

3

## Kohärenz, koherente Wellen

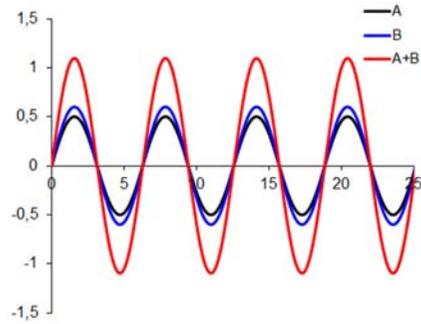
zwei Wellen gleicher Frequenz können als kohärent bezeichnet werden, wenn sie beim Aufeinandertreffen interferenzfähig sind, dh ihre **Phasendifferenz an einem bestimmten Ort zeitlich konstant ist** (oder sich sehr langsam ändert)



4

positive/**konstruktive Interferenz**

Verstärkung

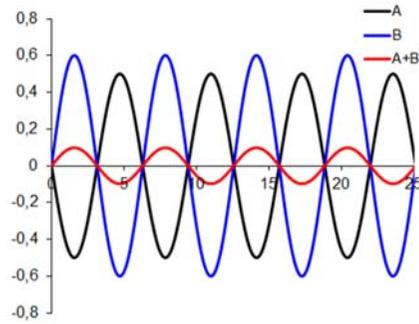


$\Delta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots =$   
 $= k \cdot \lambda = 2k \cdot (\lambda/2), \text{ wo } k=0, 1, 2, 3, \dots$

gerade Zahl mal die halbe Wellenlänge

negative/**destruktive Interferenz**

“Auslöschen”

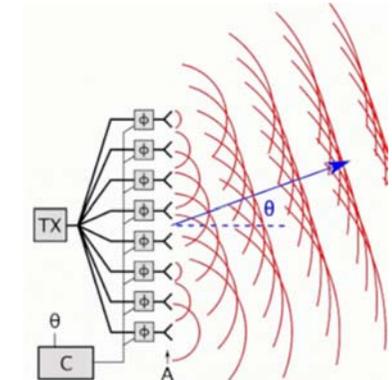
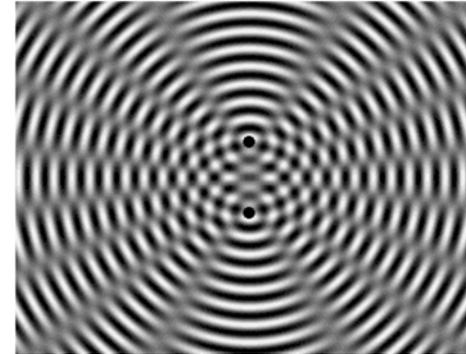


$\Delta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots =$   
 $= (2k+1) \cdot (\lambda/2), \text{ wo } k=0, 1, 2, 3, \dots$

ungerade Zahl mal die halbe Wellenlänge

Prinzip von **Huygens-Fresnel**:

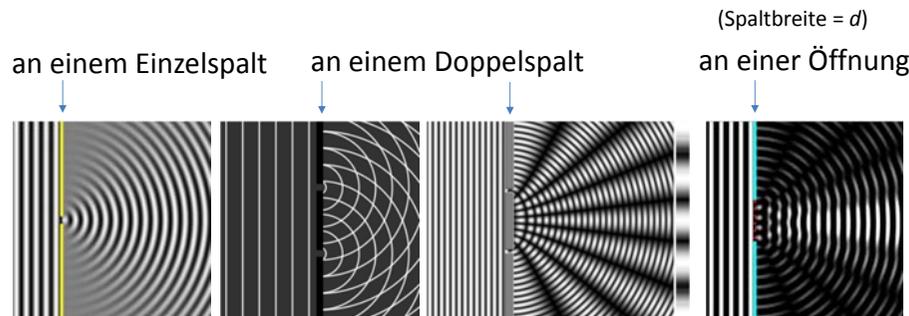
Jeder Punkt einer Wellenfront ist der Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle. Die neue Wellenfront der Welle wird durch Überlagerung aller elementarwellen gebildet.



**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



(Spaltbreite = d)

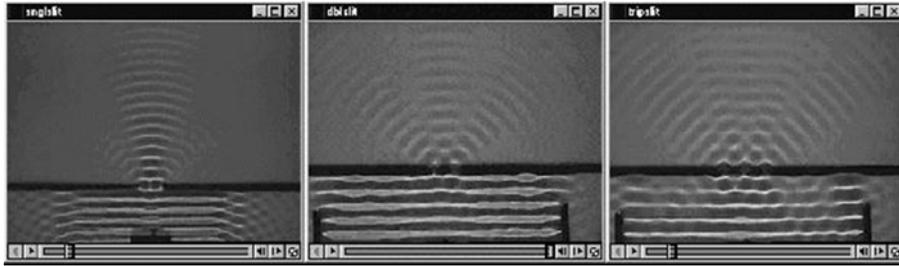
Wellenlänge =  $\lambda$

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

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

Interferenzmuster von Wasserwellen, die von zwei Quellen ausgehen





Beugung am Einzelspalt

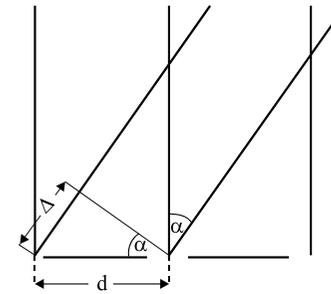
Beugung am Doppelspalt

Beugung am Dreierspalt

## Beugung am Gitter

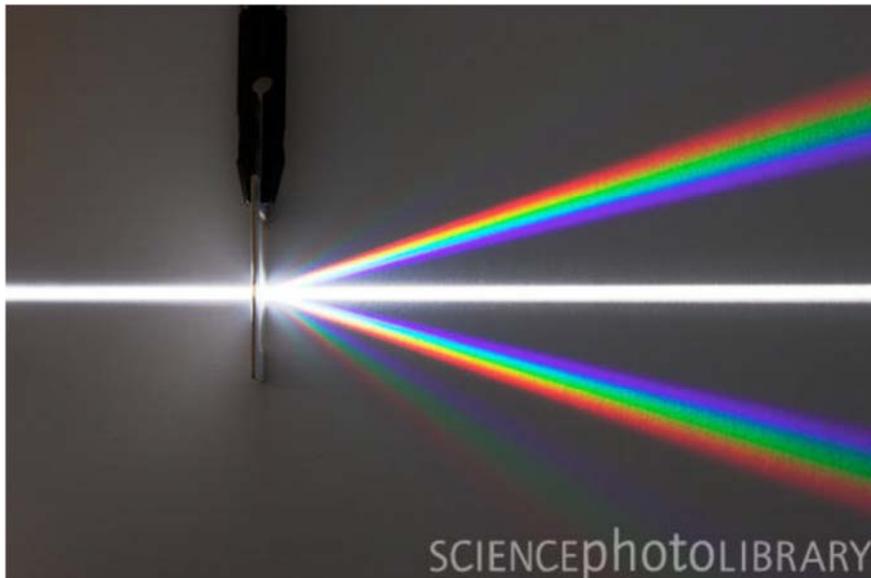
### Amplitudengitter (Transmissionsgitter)

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



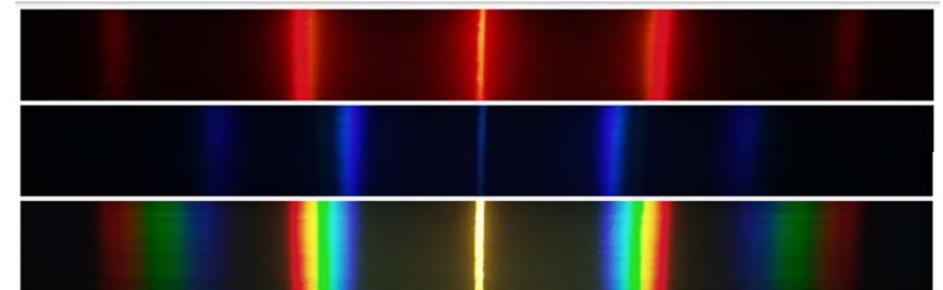
$$\Delta = d \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$$

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.



Seitenmaxima  
erster Ordnung

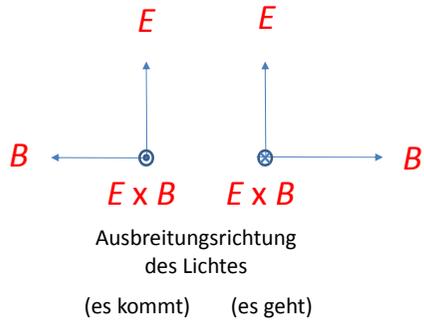
(Seiten)maximum  
nullter Ordnung



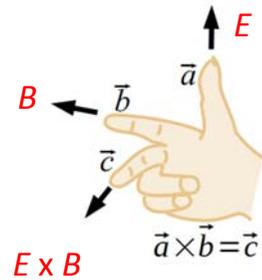
Hauptmaximum

Seitenmaxima  
zweiter Ordnung

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

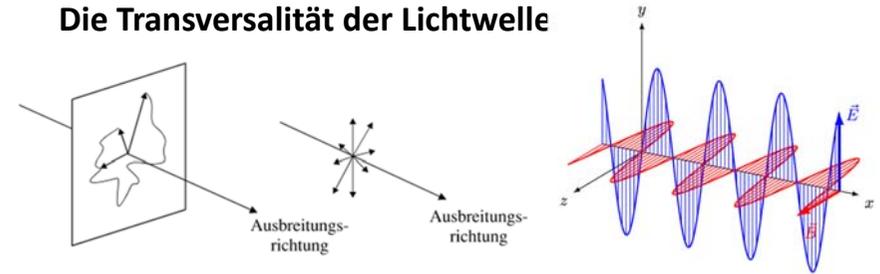


Rechte-Hand-Regel



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

## Die Transversalität der Lichtwelle

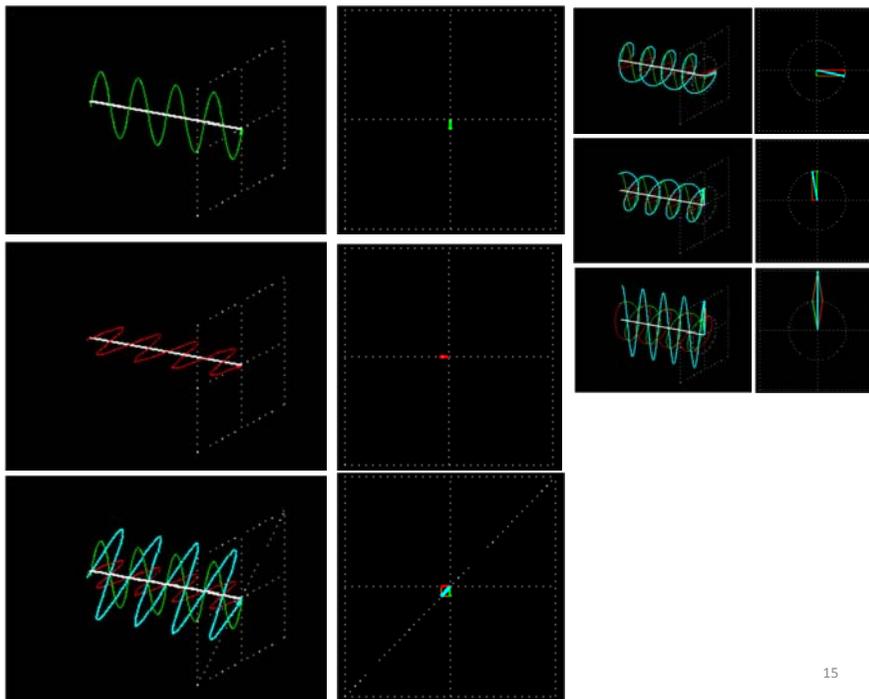


normales (**unpolarisiertes**) Licht:

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

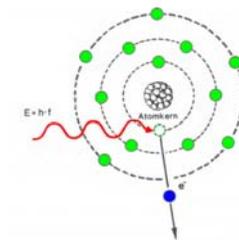
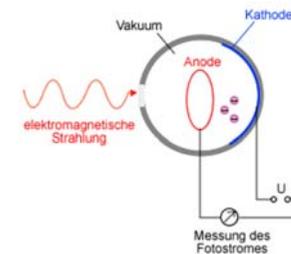
**polarisiertes Licht:**

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



## 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

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

**Einstensche Gleichung**

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

$f$ : Frequenz des Photons

$\lambda$ : Wellenlänge des Photons

$A$ : Austrittsarbeit (Ionisationsenergie),

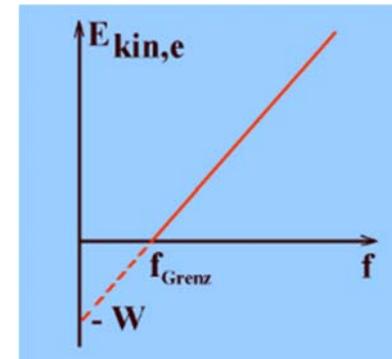
$h$ : Plancksche Konstante

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

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

17

## Graphische Darstellung der Grenzfrequenz

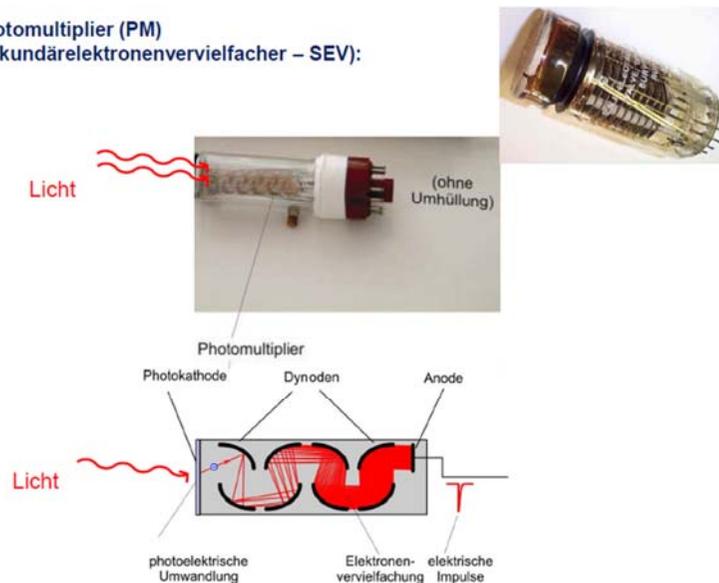


Die maximale kinetische Energie der ausgetretenen Elektronen zeigt eine lineare Abhängigkeit von der Frequenz des eingestrahlenen Lichtes.

18

## Anwendung des Photoeffekts

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



19

Rechenaufgabe:

Photonenenergie aus der Wellenlänge des Lichtes

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

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

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

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

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

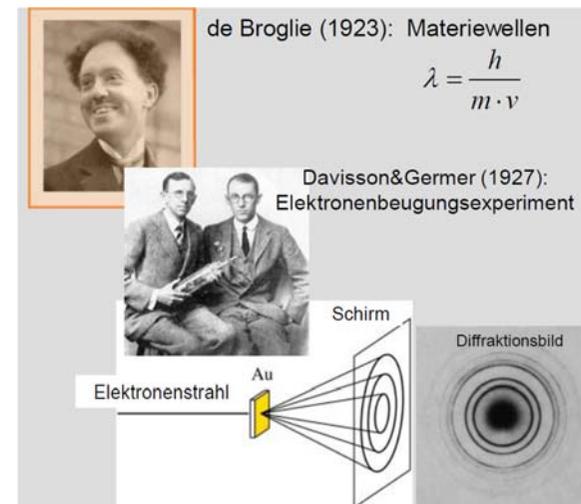
800 nm – 400 nm

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	Mittelwellen	
	3 MHz	100 m		
	30 MHz	10 m	Kurzwellen	
	300 MHz	1 m		
	3 GHz	100 mm	Dezimeterwellen	
	30 GHz	10 mm	Zentimeterwellen	
	300 GHz	1 mm		
0.01 eV	3 THz	100 $\mu$ m	Infrarotstrahlen	
0.1 eV	30 THz	10 $\mu$ m		
1 eV	300 THz	1 $\mu$ m	sichtbares Licht	Energieumsatz in der Atomhülle
10 eV	3 PHz	100 nm	Ultraviolettstrahlung	
100 eV	30 PHz	10 nm	Röntgenstrahlen	Abbremsung von Elektronen im Kernfeld
1 keV	300 PHz	1 nm		
10 keV	3 EHz	100 pm	Gammastrahlen	Energieumsatz im Atomkern
100 keV	30 EHz	10 pm		
1 MeV	300 EHz	1 pm	Gammastrahlen	Energieumsatz im Atomkern
10 MeV	$3 \times 10^{21}$ Hz	100 fm		
	$30 \times 10^{21}$ Hz	10 fm	kosmische Strahlung	Elementarteilchen und deren Zerfallsprodukte
	$300 \times 10^{21}$ Hz	1 fm		
	$3 \times 10^{24}$ Hz	100 am		
	$30 \times 10^{24}$ 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  
 Punktstrahler, Linien-, Flächen-  
 Häufigkeitsverteilung, absolute u. relative  
 Spektrum, kont., Banden-, Linien-  
 EM, mechanische Welle, Teilchenstrahlungen  
 Kernstrahlungen, ionisierende/nicht- Str.  
 Wellenmodell, Quantenmodell  
 Schwingungs-, Wellenbewegung  
 Amplitude, Phase; Amplitudenobjekt, Phasenobjekt;  
 Amplitudengitter, Phasengitter  
 longitudinale Welle, transversale Welle

23

## Vorlesung 2

Interferenz, Superposition  
 Kohärenz  
 konstruktive, destruktive Interferenz  
 Huygens-Fresnel Prinzip  
 Beugung (Diffraction)  
 Einzelspalt, Doppelspalt, Öffnung, Gitter, Haupt-, Nebenmaxima  
 Recht-Hand-Regel  
 E und B  
 Transversalität des Lichtes  
 Photoeffekt  
 PM (SEV)  
 De Broglie Wellenlänge

24