

# Strahlungsarten und ihre gemeinsame Eigenschaften.

## Elektromagnetische Strahlungen.

### Licht als Welle: Beugung, Interferenz.

### Teilchencharakter des Lichtes

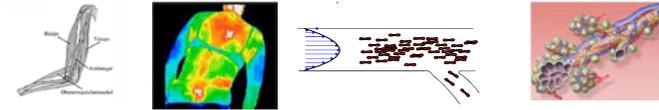


<http://biofiz.semmelweis.hu/>  
kaposi.andras@med.semmelweis-univ.hu

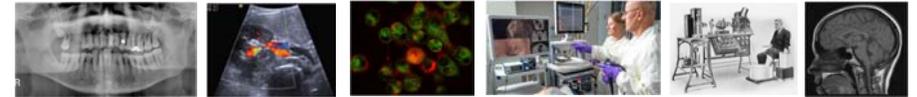
KAD 2020.09.22

## Physik in der (Zahn-)Medizin

Lebensprozesse: Hebelfunktion, Wärmestrahlung, Strömungen, Diffusion, ...



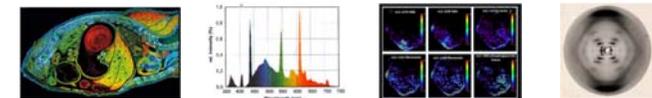
Diagnostik: Röntgendiagnostik, Sonographie, optische Tomographie, Endoskopie, EKG, MRI, ...



Therapie: Phototherapie, Laserchirurgie, Gamma-Messer, Nierensteinzertümmung, ...



med. Forschung: Mikroskopie, optische Spektroskopie, Massenspektrometrie, Rtgdiffraction, ...



Strahlung: Energie wird transportiert

Energie (gesamte Energie),  $E$   $[E] = \text{J (Joule)}$

Energiestrom = Leistung  $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$   $[P] = \text{W (Watt)}$

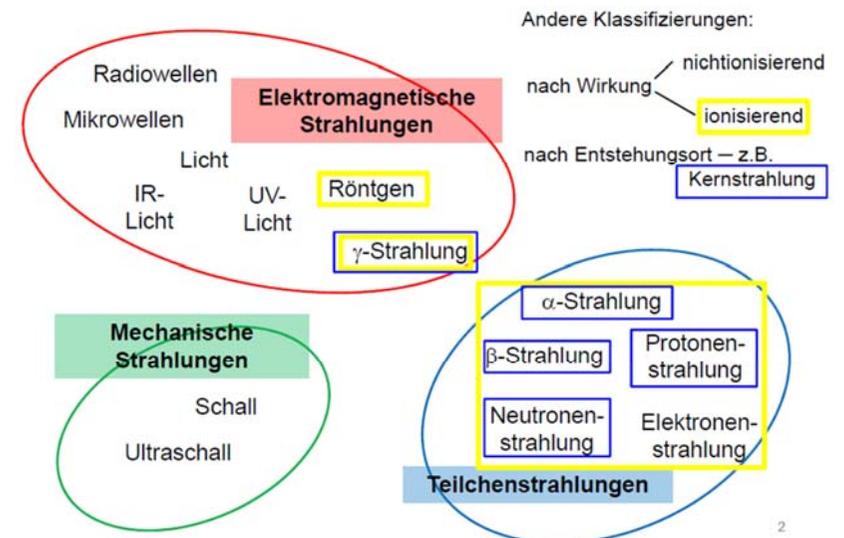
$\Delta E$ : die transportierte Energie während der Zeitspanne  $\Delta t$

Energiestromdichte = Leistungsdichte = Intensität  $[J] = \text{W/m}^2$

$$J = \frac{P}{A} = \frac{1}{A} \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

$A$ : die Fläche (senkrecht zur Richtung der Strahlung)

## Klassifizierung der Strahlungen



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

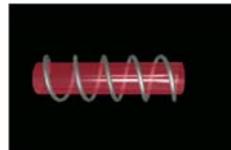
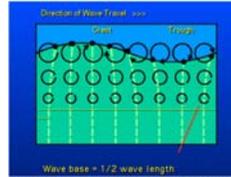
Experimente (z. B. Photoeffekt) – Licht besteht aus Teilchen (Quanten)

Exakt: Quantenfeldtheorie

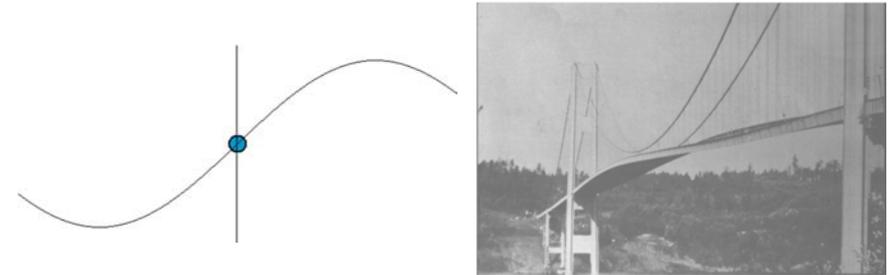
Annäherungsmöglichkeiten (Modelle):

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

(Welle-Teilchen-Dualismus)



## Schwingung



periodische Bewegungen: Schwingung und Welle

**Schwingungsbewegung**, "nur" zeitliche Periodizität

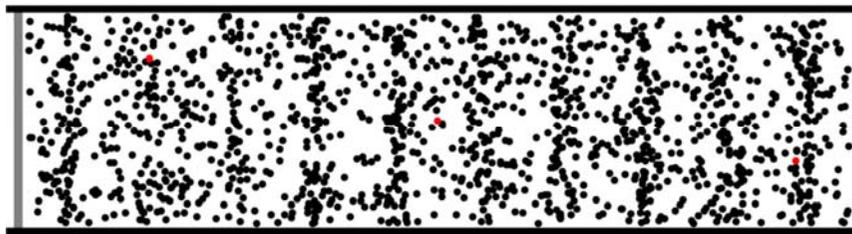
- zeitliche Periode, Periodenzeit, Schwingungsdauer,  $T$
- Kehrwert:  $1/T=f$ , Frequenz

$$u(t) = u_{\max} \sin[2\pi(t/T)] = u_{\max} \sin[2\pi ft] = u_{\max} \sin[\omega t]$$

$u_{\max}$ : Amplitude      [...]: Phase       $\omega$ : Kreisfrequenz

6

## longitudinale Welle

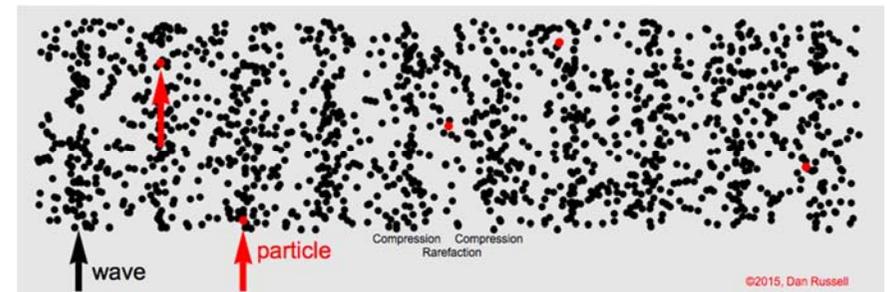


©2011, Dan Russell

bewegende Fläche (Wellenquelle)

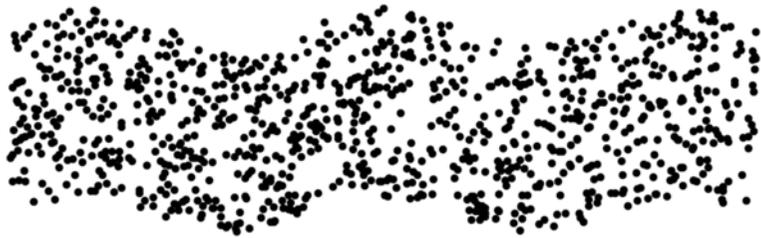
Schwingungsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung

## longitudinale Welle



die Teilchen bleiben in seiner Umgebung

### transversale Welle



Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

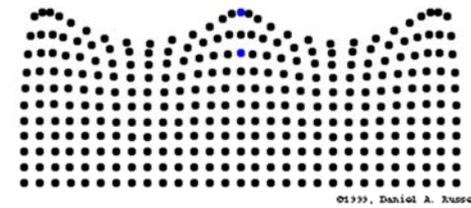
### longitudinale Welle



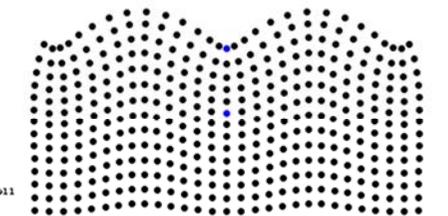
### transversale Welle



### Oberflächenwelle



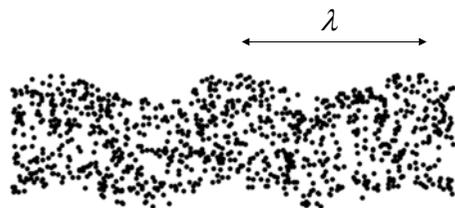
### Rayleigh Welle



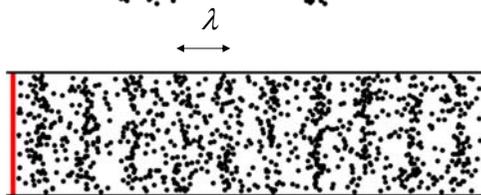
### Wellenbewegung

Ausbreitung eines Schwingungszustandes in einem schwingungsfähigen Medium. Räumlich und zeitlich periodischer Vorgang.

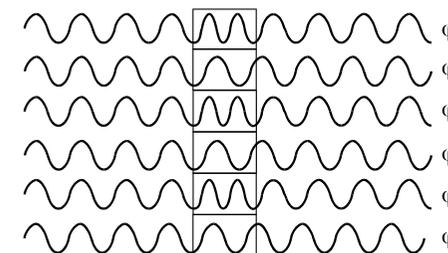
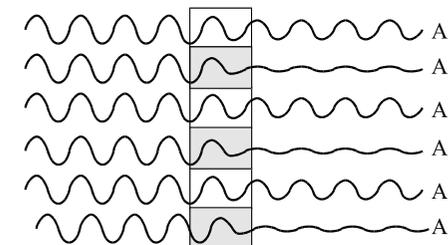
transversale Welle:



longitudinale Welle:



### Amplitude und Phase



$$u(x,t) = u_{\max} \sin[\varphi(x,t)]$$

$u_{\max}$  Amplitude

$$\varphi(x,t) = \omega t - kx = 2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda}$$

(Wellen-)Phase

**Wellengleichung**  $u(x,t) = u_{\max} \sin \left[ 2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda} \right]$

$(vt = s \leftrightarrow) \quad \boxed{cT = \lambda} \Rightarrow \lambda f = c$

Fortpflanzungsgeschwindigkeit  
mal die zeitliche Periode gibt die  
örtliche Periode

Licht: **elektromagnetische** Welle, transversale Welle

$u(x,t)$ :  $E$  (elektrische Feldstärke) und

$B$  (magnetische Feldstärke/ Induktion)

13

**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

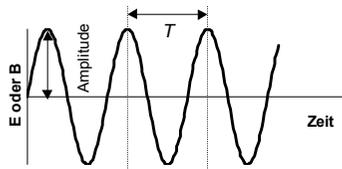
Prinzip von **Huygens-Fresnel:**

Jeder Punkt einer Wellenfläche ist der Ausgangspunkt einer Elementarwelle. Die äussere Einhüllende solcher Elementarwellen bildet wieder eine neue Wellenfläche der vom primären Erregungszentrum ausgehenden Welle.

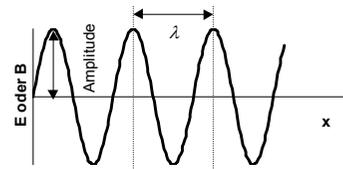
14

**Zeitliche und räumliche Periodizität**

räumlicher Punkt fixiert



zeitlicher Punkt fixiert



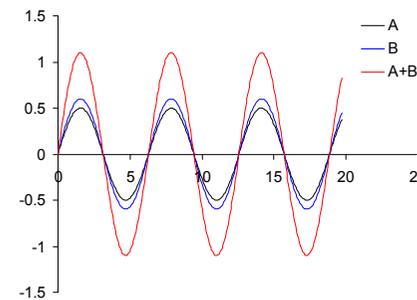
Interferenz: Überlagerung von Wellen

Um eine dauernde Interferenz zu erhalten, müssen die Wellen dieselbe Phase (Beziehung) zueinander behalten – **Kohärenz**

15

positive/konstruktive Interferenz

Verstärkung

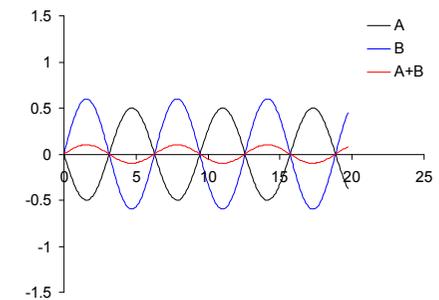


$\Delta l = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots =$

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

negative/destruktive Interferenz

“Auslöschen”

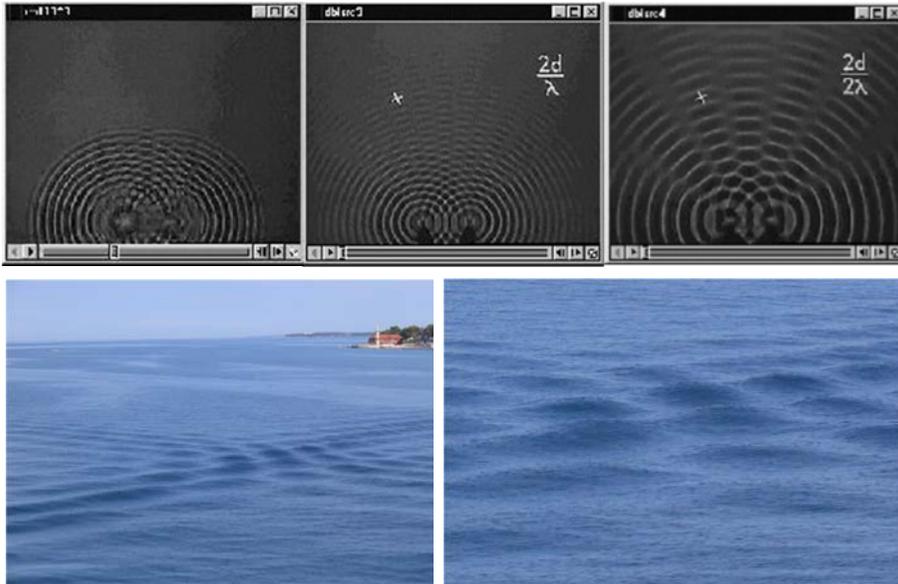


$\Delta l = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots =$

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

16

## Interferenzmuster von Wasserwellen, die von zwei Quellen ausgehen



## Beugung (=Diffraction)

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

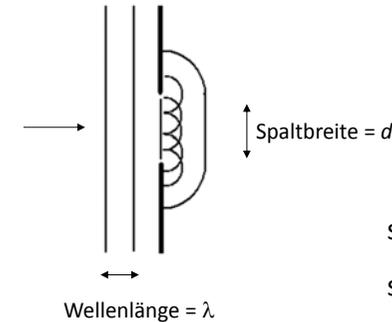
### Huygens (-Fresnel)

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

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

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

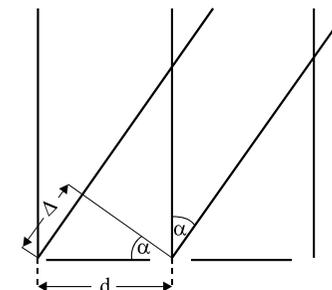
Beugung an einer Öffnung



## Beugung am Gitter

Amplitudengitter

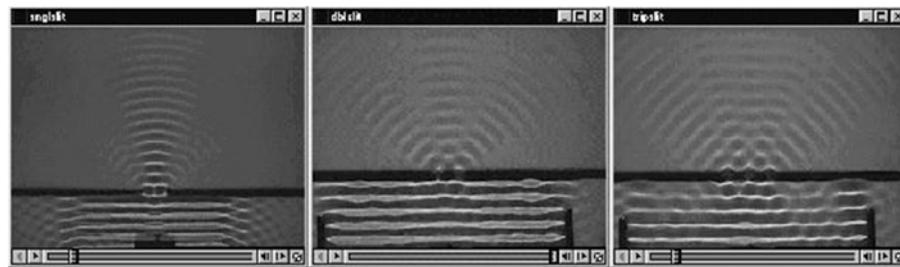
Unter einem optischen Gitter versteht man ein Objekt, in dem sich die Bedingungen der Lichtausbreitung periodisch ändern.



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

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.

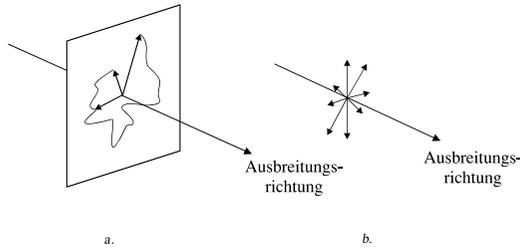


Beugung am Einzelspalt

Beugung am Doppelspalt

Beugung am Dreierspalt

## Die Transversalität der Lichtwelle

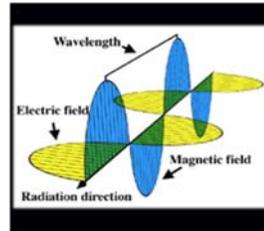


### normales (unpolarisiertes) Licht:

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

### polarisiertes Licht:

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

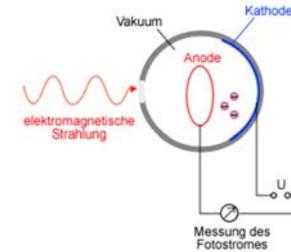


elektrischer ( $E$ ) und magnetischer ( $B$ ) Feldvektor schwingen immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

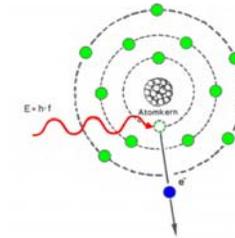
21

## 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

22

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

### Einstensche Gleichung

$\varepsilon, f, \lambda$ : (Quanten-)Energie, Frequenz, Wellenlänge des Photons  
 $A$ : Austrittsarbeit (Ionisationsenergie),  $h$ = Plancksche Konstante

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

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

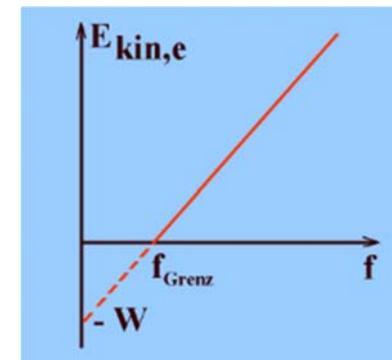
**Elektronenvolt** als Energieeinheit:

(elektrische Arbeit)=(Ladung)·(Spannung)

$$W = e \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

23

## Graphische Darstellung der Grenzfrequenz



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

24

Energie	Frequenz	Wellenlänge	Bezeichnung	Emissionsquelle
	30 Hz	10 <sup>4</sup> km	niederfrequente Wellen	Generatoren der Industrie
	300 Hz	10 <sup>3</sup> km		
	3 kHz	10 <sup>2</sup> 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	Ultrakurzwellen	
	3 GHz	100 mm	Dezimeterwellen	
	30 GHz	10 mm	Zentimeterwellen	
	300 GHz	1 mm		
0.01 eV	3 THz	100 μm	Infrarotstrahlen	
0.1 eV	30 THz	10 μm		
1 eV	300 THz	1 μm	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	Röntgenstrahlen	Abbremsung von Elektronen im Kernfeld
100 keV	30 EHz	10 pm		
1 MeV	300 EHz	1 pm	Gammastrahlen	Energieumsatz im Atomkern
10 MeV	3x10 <sup>21</sup> Hz	100 fm		
	30x10 <sup>21</sup> Hz	10 fm	kosmische Strahlung	Elementarteilchen und deren Zerfallsprodukte
	300x10 <sup>21</sup> Hz	1 fm		
	3x10 <sup>24</sup> Hz	100 am		
	30x10 <sup>24</sup> Hz	10 am		

25

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

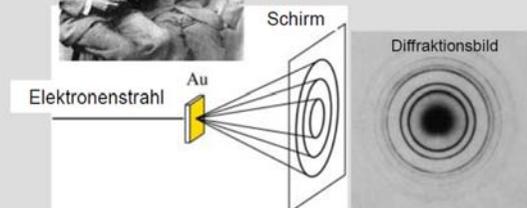


de Broglie (1923): Materiewellen

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$



Davisson & Germer (1927):  
Elektronenbeugungsexperiment



26