

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

Strahlung: Energie wird transportiert

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

Energiestrom = Leistung $[P] = \text{W (Watt)}$

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

ΔE : die transportierte Energie während der Zeitspanne Δt

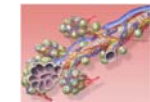
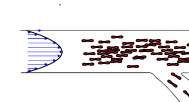
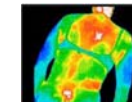
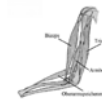
Energiestromdichte = Leistungsdichte = Intensität $[J] = \text{W/m}^2$

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

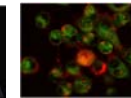
A : die Fläche (senkrecht zur Richtung der Strahlung)

Physik in der (Zahn-)Medizin

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



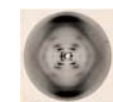
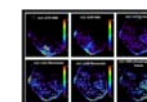
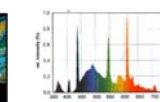
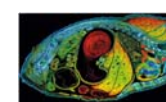
Diagnostik: Röntgendiagnostik, Sonographie, optische Tomographie, Endoskopie, EKG, MRI, ...



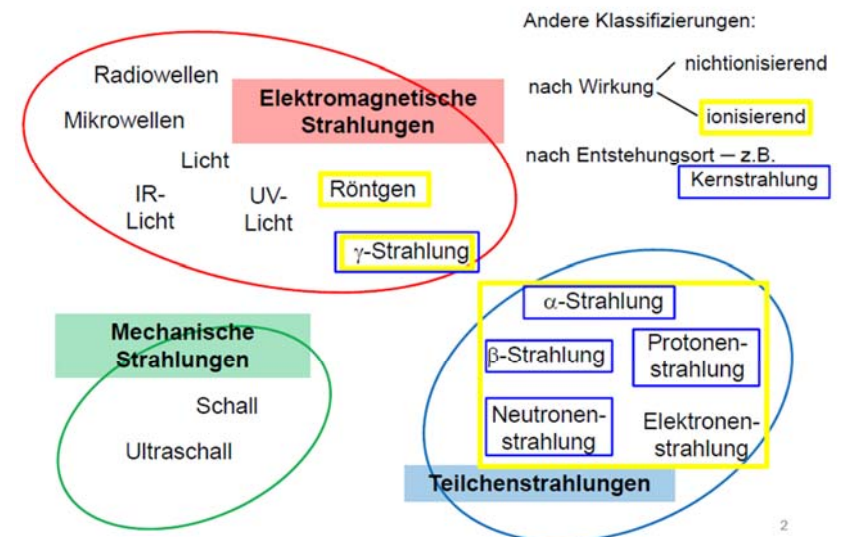
Therapie: Phototherapie, Laserchirurgie, Gamma-Messer, Nierensteinzertümmung, ...



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



Klassifizierung der Strahlungen



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

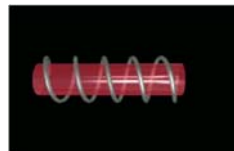
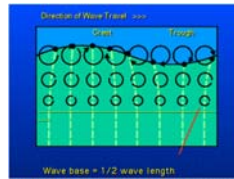
Experimente (z. B. Photoeffekt) – Licht besteht aus Teilchen (Quanten)

Exakt: Quantenfeldtheorie

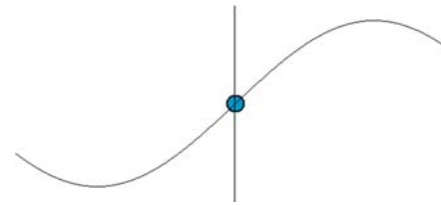
Annäherungsmöglichkeiten (Modelle):

- **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

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

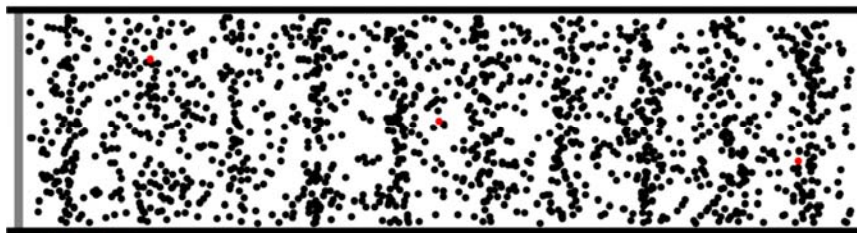
u_{\max} : Amplitude

[...]: Phase

ω : Kreisfrequenz

6

longitudinale Welle

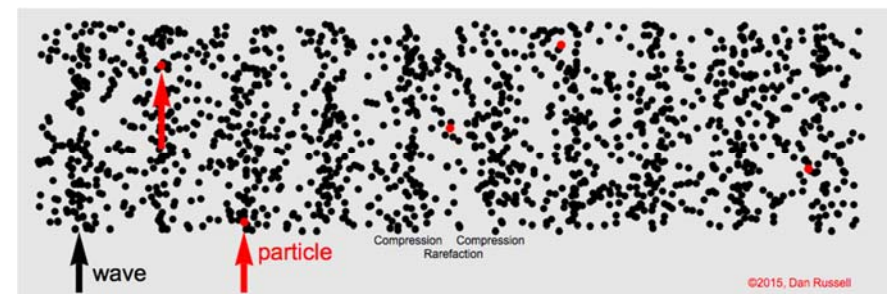


©2011, Dan Russell

bewegende Fläche (Wellenquelle)

Schwingungsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung

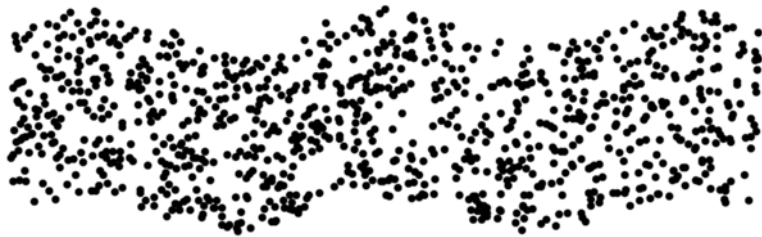
longitudinale Welle



©2015, Dan Russell

die Teilchen bleiben in seiner Umgebung

transversale Welle

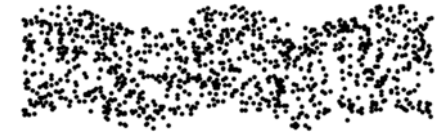


Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

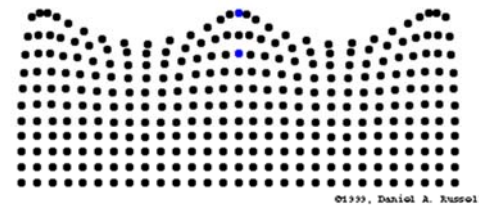
longitudinale Welle



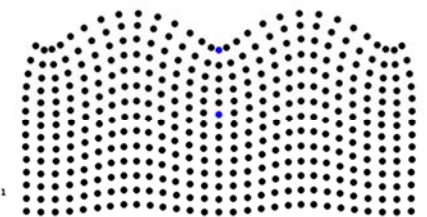
transversale Welle



Oberflächenwelle



Rayleigh Welle

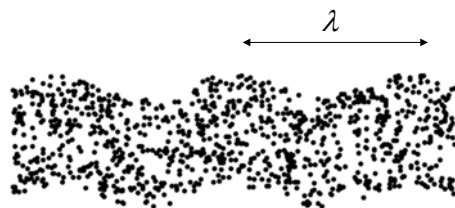


10

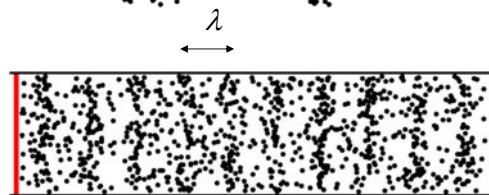
Wellenbewegung

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

transversale Welle:

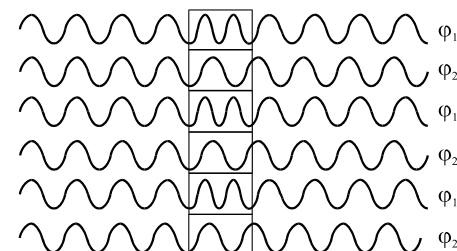
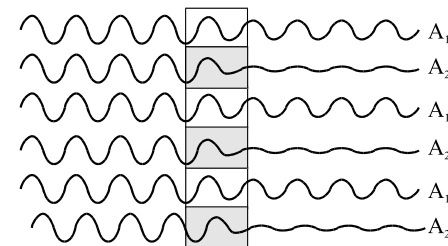


longitudinale Welle:



11

Amplitude und Phase



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

u_{\max} Amplitude

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

(Wellen-)Phase

12

Wellengleichung

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

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

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

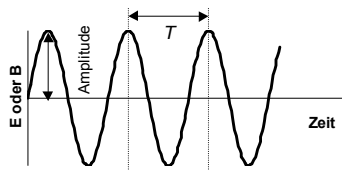
Prinzip von **Huygens-Fresnel**:

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.

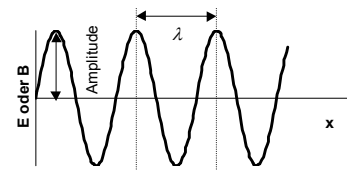
14

Zeitliche und räumliche Periodizität

räumlicher Punkt fixiert



zeitlicher Punkt fixiert



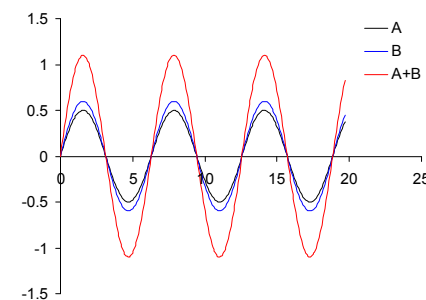
Interferenz: Überlagerung von Wellen

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

15

positive/konstruktive Interferenz

Verstärkung

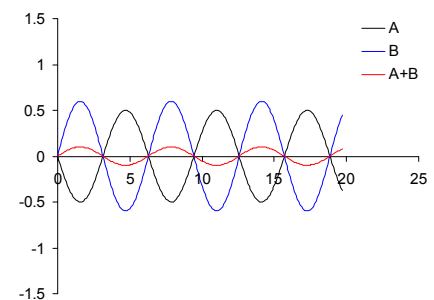


$$\Delta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots =$$

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

negative/destruktive Interferenz

“Auslöschen”

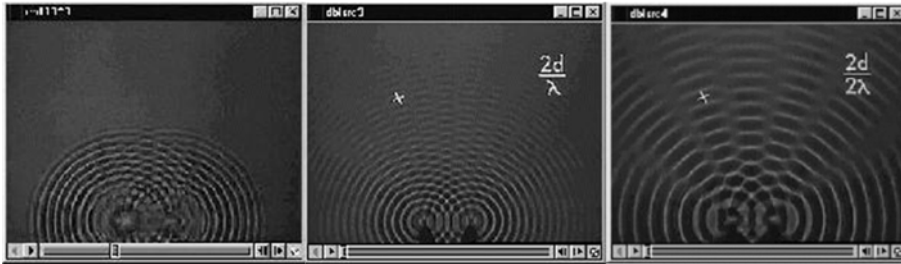


$$\Delta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots =$$

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

16

Interferenzmuster von Wasserwellen, die von zwei Quellen ausgehen



Beugung (=Diffraction)

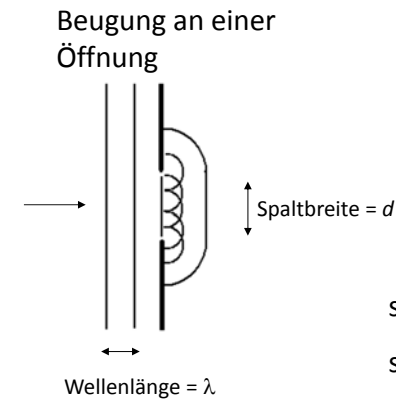
Ablenkung des Lichtes an Objekten im Wellenfeld, die die komplexe Amplitude örtlich ändern, aufgrund des Huygensschen Prinzips

Huygens (-Fresnel)

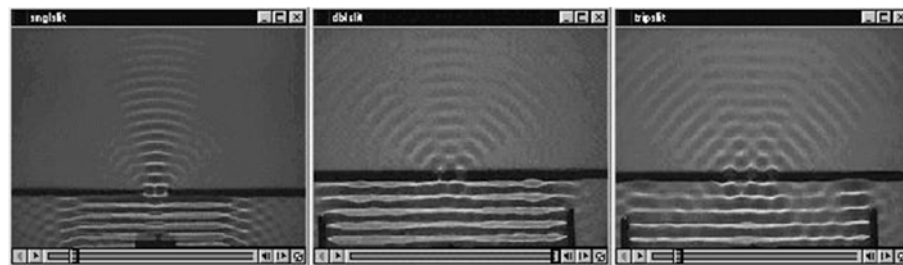
Jeder Punkt einer Wellenfront ist der Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle. Die neue Wellenfront der Welle wird durch Überlagerung aller elementarwellen gebildet.

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

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



18



Beugung am Einzelspalt

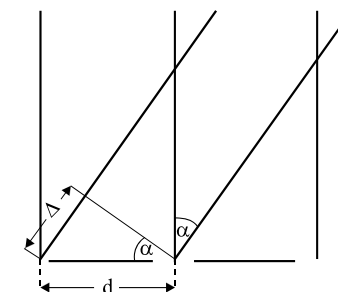
Beugung am Doppelspalt

Beugung am Dreierspalt

Beugung am Gitter

Amplitudengitter

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



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

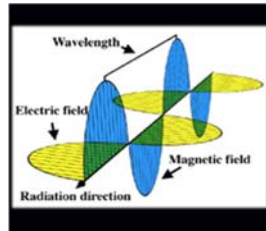
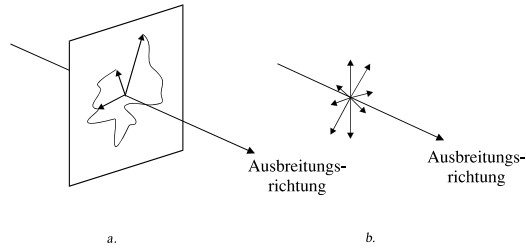
Die zu den Werten $k = 0, 1, 2, \dots$ gehörenden Maxima werden als Diffraktionsbilder oder **Seitenmaxima** nullter, erster, zweiter ... Ordnung bezeichnet, das von nullter Ordnung wird auch **Hauptmaximum** genannt.

Das gesamte Beugungsbild ist symmetrisch zum Hauptmaximum.

19

20

Die Transversalität der Lichtwelle



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

normales (unpolarisiertes) Licht:

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

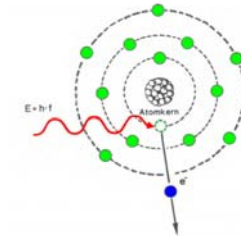
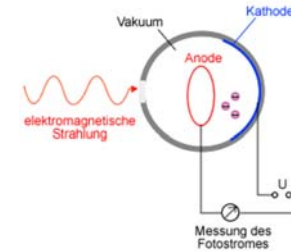
polarisiertes Licht:

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

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

ε, f, λ : (Quanten-)Energie, Frequenz, Wellenlänge des Photons
 A : Austrittsarbeit (Ionisationsenergie), h = Plancksche Konstante

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

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

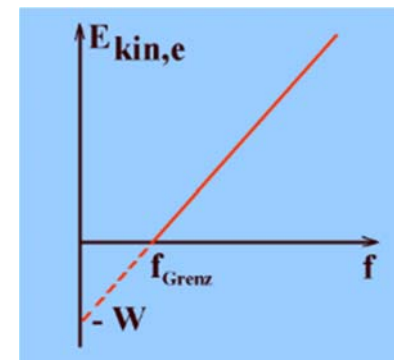
Elektronenvolt als Energieeinheit:

(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 eingestrahlen Lichtes.

24

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 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		
	30×10^{21} Hz	10 fm	Gammastrahlen	Energieumsatz im Atomkern
	300×10^{21} Hz	1 fm		
	3×10^{24} Hz	100 am		
	30×10^{24} Hz	10 am	kosmische Strahlung	Elementarteilchen und deren Zerfallsprodukte


25

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

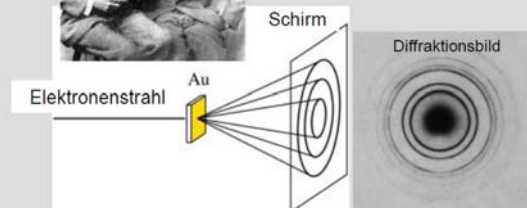


de Broglie (1923): Materiewellen

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



Davisson&Germer (1927): Elektronenbeugungsexperiment



26