

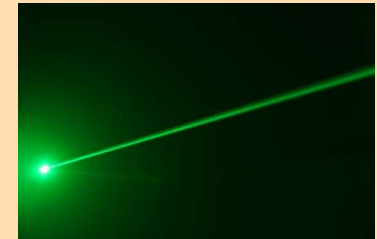
Lasertechnik VL-2

Mechatronik 4.tes Semester

Vorlesung Sommersemester 2023

VL: Prof. Dr. Thomas Hebert (thebert@fb2.fra-uas.de)

Labor: Hans-Peter Tögel, Lutz Zimmermann, Prof. Kurt Jansen



Fachbereich 2 Informatik und Ingenieurwissenschaften

Wie entsteht Licht?

Klassische Physik

- **Temperaturstrahlung:**
Jeder Körper sendet je nach Temperatur elektromagnetische Strahlung aus. Liegt die im richtigen Frequenzbereich, so dass das menschliche Auge sie wahrnehmen kann, nennen wir sie **Licht**

Beispiele:
Glühendes Metall,
Sonne,
Glühfaden in Glühbirne,



"Dieses Foto" von Unbekannter Autor
ist lizenziert gemäß [CC BY-SA](#)

Denkmodell:

- Material besteht aus vielen Schwingenden Quellen → **Schwingende Ladungen → Schwingende Dipole**
- **Licht als Elektromagnetische Welle**
- Dipolstrahlung (Animation) | LEIFIphysik

Quantenphysik

- **Emission durch Elektronensprünge:**
Springen Elektronen von einem höheren Energieniveau auf ein niedrigeres, wird pro Sprung ein Lichtquant abgegeben, dessen Frequenz so sein muss, dass seine Energie gleich der Energiedifferenz der beiden Zustände wird. Dieses Licht ist naturgemäß monochromatisch.
$$h \cdot \nu = E_1 - E_2 = \Delta E$$

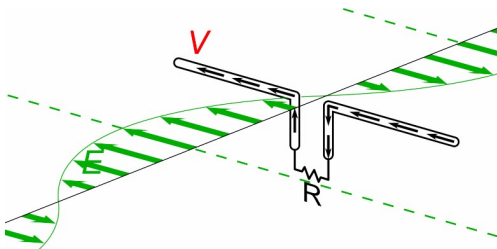
Beispiele:
Quecksilberdampf-Lampe
Natriumdampf-Lampe
Laser
LED
Chemo-, Biolumineszenz

- Licht als Photonen,
- die durch „Energie-Übergänge in Atome, Molekülen, Festkörpern“ erzeugt werden

Erzeugung elektromagnetischer Felder/Wellen

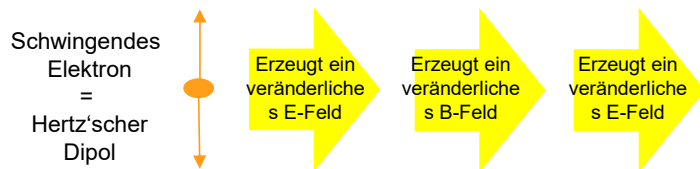
Makroskopische Sicht

- Dipolantenne:
 - Elektronen werden hin- und her bewegt
 - (Maxwell Glg. Wirken)



https://de.wikipedia.org/wiki/Dipolantenne#/media/Datei:Dipole_receiving_antenna_animation_6_800x394x150ms.gif

Quelle: Wikipedia



- ➔ Elektromagnetische Welle

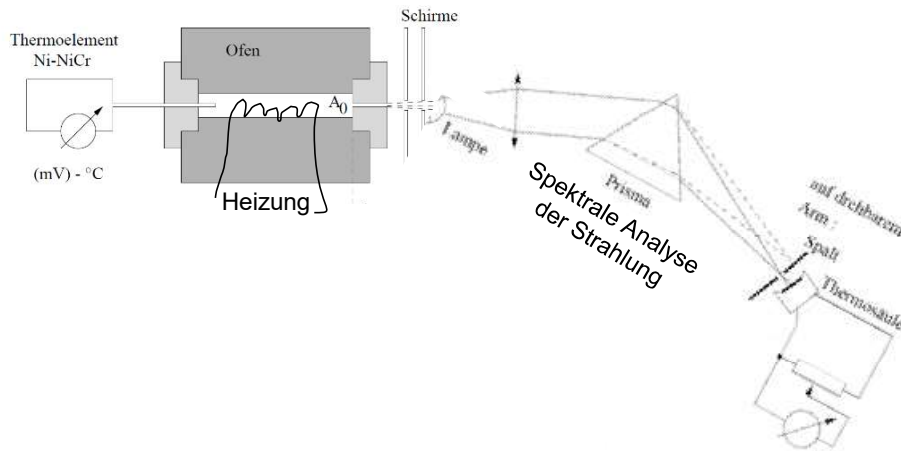
Mikroskopisch Sicht (Klassische Physik)

- ❖ Atomkerne und Elektronen können als „Federschwinger“ bzw. als „schwingende Dipole“ angesehen werden
- ❖ Die schwingenden Dipole erzeugen elektromagnetische Strahlung und können ebenso durch Strahlung von aussen Energie aufnehmen
- ❖ Die Energie/Frequenz der „Federschwinger“ hängt stark von der Temperatur ab. Diese thermische Bewegung führt zu periodischen Ladungsverschiebungen Atomen, Molekülen, Kristallen, „elektrische Polarisierung“
- ❖ Thermisches Licht:
 - Schwingung der Atome (eines Kristallgitters) erzeugt eine veränderliche Polarisierung und elektromagnetische Wellen / Strahlung
 - Bsp. Sonnenlicht, Glühbirne, Glühendes Metall, ...

Die spektrale Verteilung der thermischen Strahlung kann auch experimentell untersucht werden:

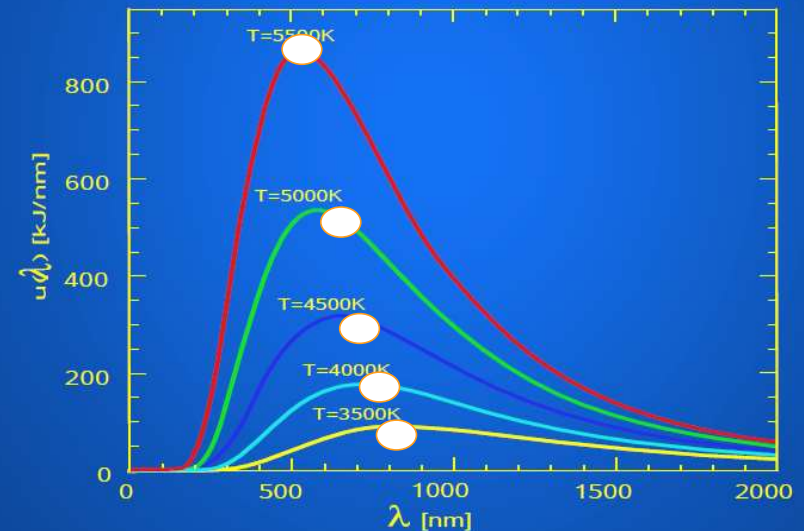
Lichtquelle = Ofen

➔ „Hohlraumstrahler“ oder „Schwarzer Strahler“



Die theoretische Erklärung dieser Messungen war um 1900 ein „heißes“ Thema in der Physik.

spektrale Verteilung der Hohlraumstrahlung



Grenzen der klassischen Physik bei der Erklärung des spektralen Verlaufs der Hohlraumstrahlung

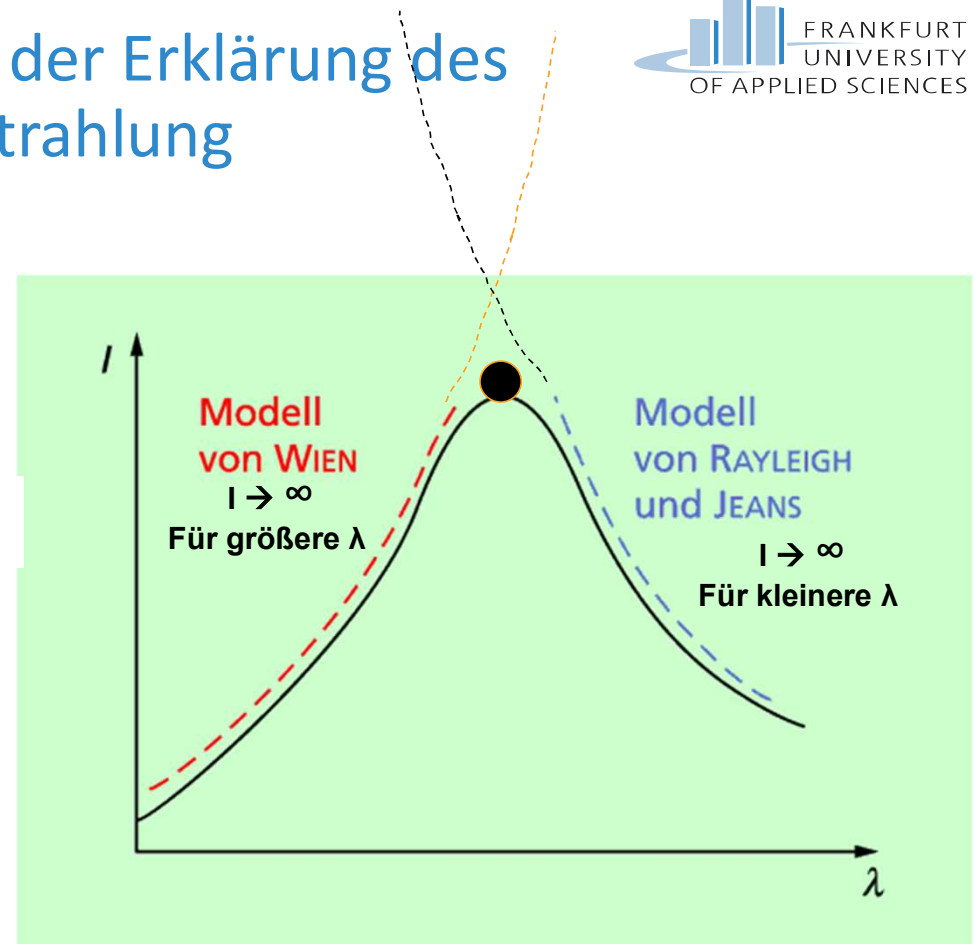
Um 1900 existierten zwei verschiedene Modelle für die zur Erklärung des Spektrums der Hohlraumstrahlung:

- Modell 1:
vom deutschen Physiker WILHELM WIEN
• Wien'sches Verschiebungsgesetz $\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu\text{m K}}{T}$
- bJ. W. S. RAYLEIGH (1842-1919) und J. J. JEANS (1877-1946).

Beide Modelle basierten ausschließlich auf
Schlußfolgerungen aus Teilbereichen der klassischen Physik

- **Thermodynamik und**
- **Elektrodynamik**

Beide Modelle beschreiben aber jeweils nur einen Teil des Kurvenverlaufs korrekt (siehe Bild).



Erklärungsansatz von Max Planck (1900) mit der Annahme: „Lichtfrequenzen sind nicht beliebig/kontinuierlich sondern kommen in gequantelten Einheiten vor“

Um dieses Problem zu lösen, machte der deutsche Physiker MAX PLANCK) eine ungewöhnliche, völlig im Gegensatz zu den bisherigen Vorstellungen der Physik stehende, Annahme:

- Energie des Hohlraumstrahlers wird nicht in unendlich vielen, beliebig kleinen Teilen abgestrahlt
- sondern die abgestrahlte Energie setzt sich aus **einer endlichen Anzahl von „Energieportionen“ oder „Quanten“** zusammen

Bei der Auswertung der experimentell ermittelten Energieverteilungen fand MAX PLANCK im Jahr 1900 eine Konstante für den Zusammenhang zwischen Anzahl und Energie der Quanten und der Frequenz der zugehörigen elektromagnetischen Welle:

- Diese Konstante wird ihm zu Ehren als **Planck'sche Konstante** oder als **Planck'sches Wirkungsquantum** $h = 6,626 * 10^{-34} \text{ Js}$ bezeichnet.

$$E(\text{nergie}) = N (\text{Anzahl der „Portionen“}) * h (\text{Planck'sche Konstante}) * \nu (\text{Frequenz})$$

$$E = N * h * \nu$$

Der Ansatz $E = n \cdot h \cdot \nu$ ermöglichte eine theoretische Erklärung der spektralen Verteilung der Hohlraumstrahlung und lieferte den Grundstein für die Entwicklung der Quantenmechanik und brachte 1918 den Nobelpreis für Max Planck

$$E_f = \frac{2 h \cdot f^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot f}{k \cdot T}} - 1}$$

E_f pro Flächeneinheit im Frequenzbereich

f bis $f + \Delta f$ abgestrahlte Energie

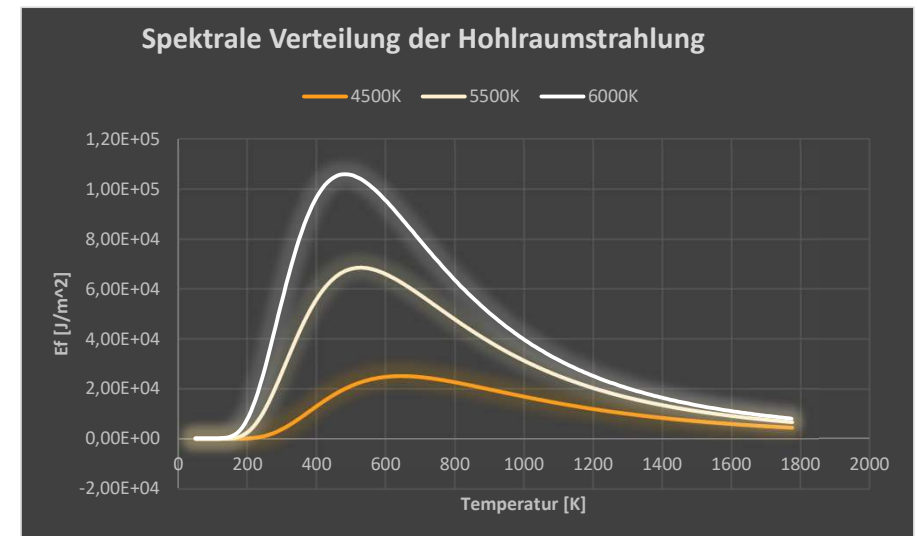
h plancksches Wirkungsquantum

f Frequenz

c Lichtgeschwindigkeit

T absolute Temperatur

k Boltzmann Konstante



Übung:
Versuchen Sie dieses Bild in Excel, Scidavis
o.ä. zu reproduzieren

Der Planck Ansatz:

$$E = h \nu$$

Planck'sches Wirkungsquantum $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Frequenz des Lichts: ν

Energie eines Photons: E

Legt den Grundstein für die Beschreibung von Licht als Strom von Teilchen (= Photonen) und ist der Startpunkt für die Entwicklung der Quantenphysik, mit der mikroskopische Eigenschaften von Atomen, Molekülen, Festkörpern... erklärt werden können.

Lichtelektrischer Effekt

Ein Schlüsselversuch ist der Versuch zum „lichtelektrischen Effekt“ bzw. „äußerer Photoeffekt“.

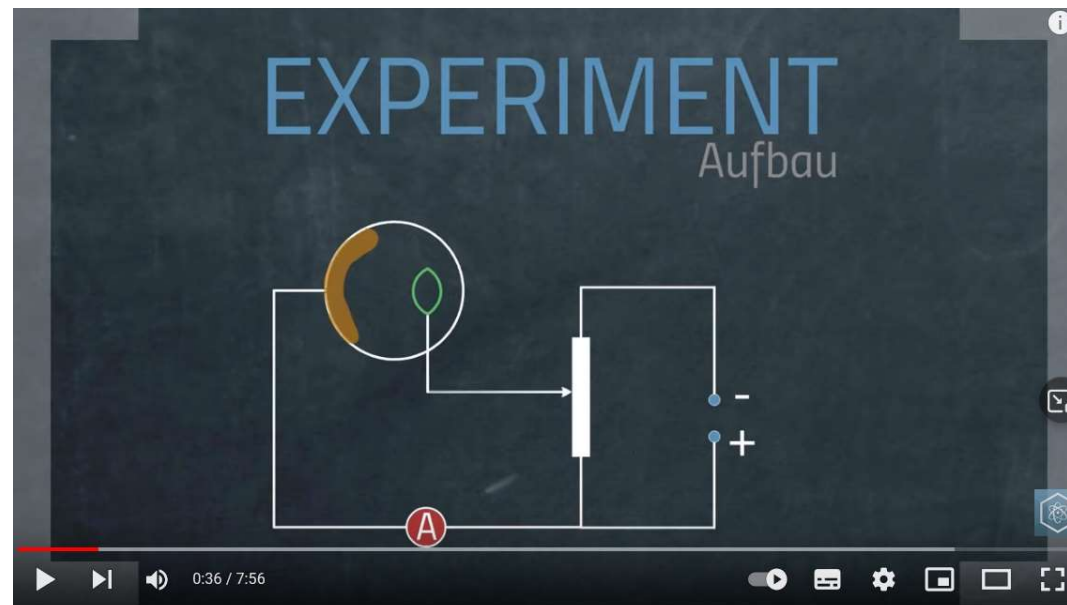
Der Versuch liefert Ergebnisse, die mit dem Wellenbild nicht erklärt werden konnten. Für die Erklärung mit dem Teilchenmodell von Licht bekam Albert Einstein 1921 den Nobelpreis.



Photoeffekt VIDEO

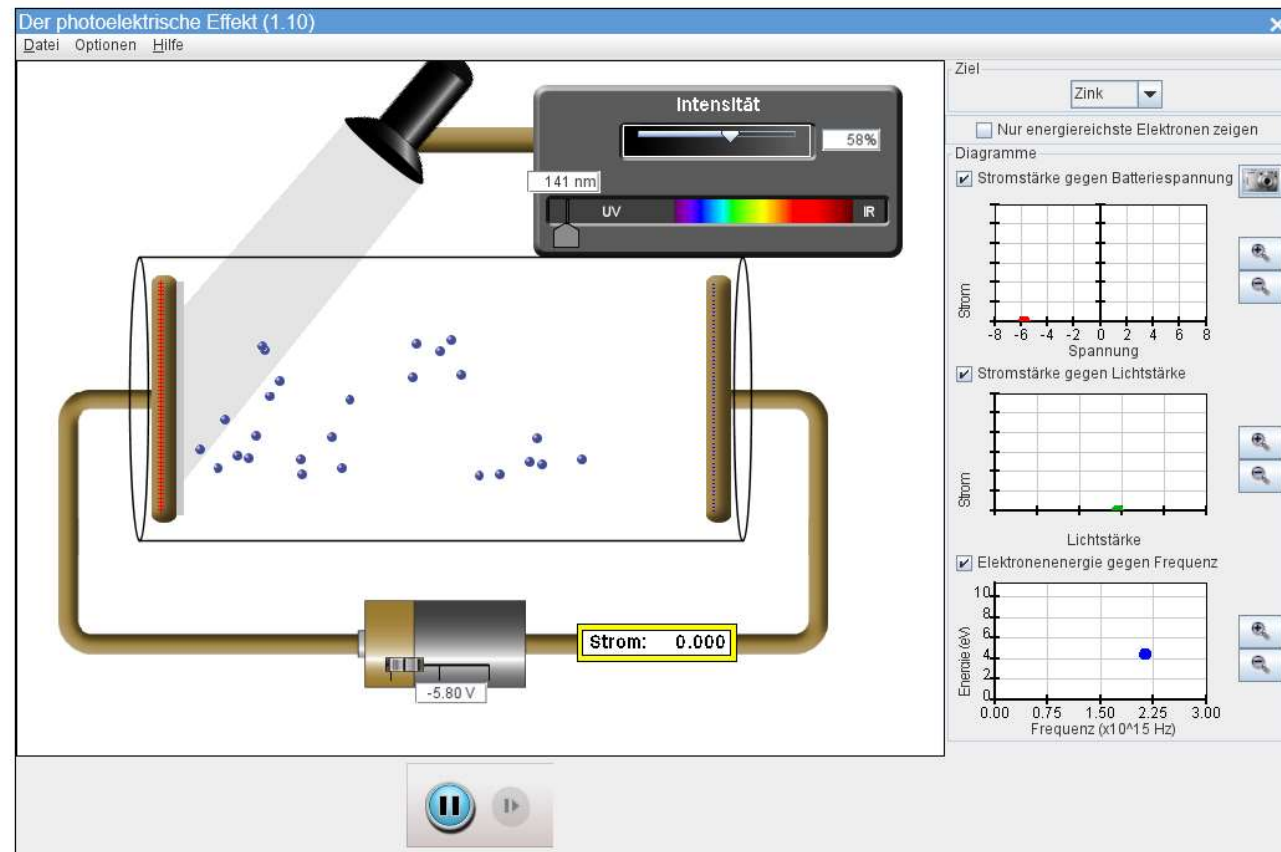
Animierter Versuch & Erklärung, Dauer 7:56

https://www.youtube.com/watch?v=9_JoTCVitWU

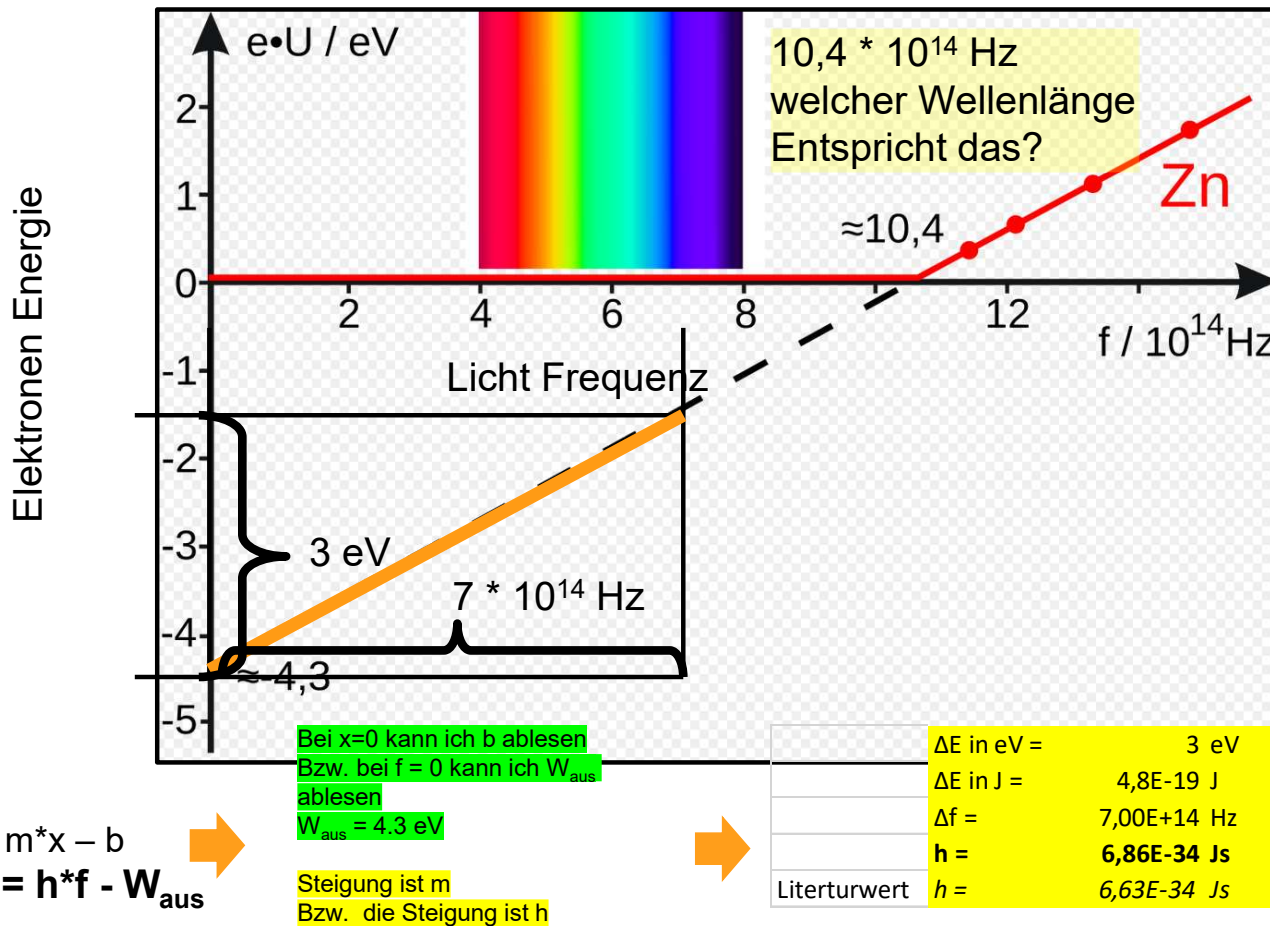


Photoeffekt Simulation

<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpi/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric&locale=de>



Photoeffekt Messergebnis „Energie der Elektronen für verschiedene Lichtfrequenzen“ mit einer Zink (Zn) Kathode

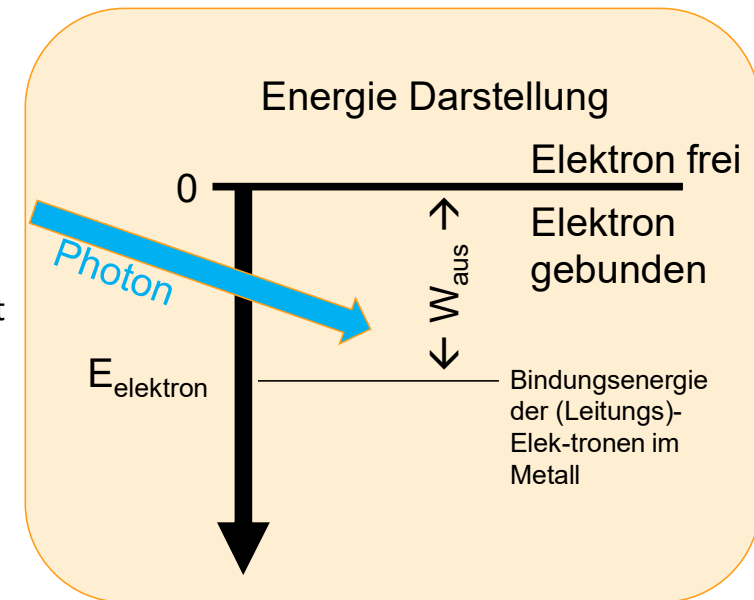
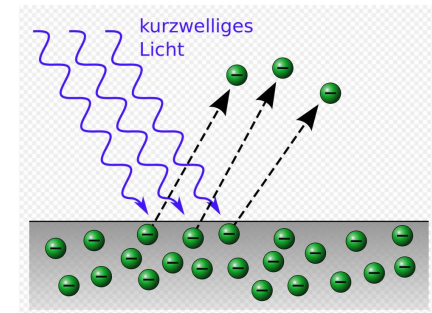


1. Mit der Gegenspannung U wird die Energie der ausgetretenen Elektronen gemessen: $E = q \cdot U$ ($q = e$ = Ladung eines Elektrons)
2. Lichtfrequenz f mit $f = c / \lambda$ kann variiert werden
3. Für $f < 10,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ treten keine Elektronen aus
4. Für $f > 10,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ werden Elektronen mit linear zunehmender Energie gemessen.
5. Die Intensität des Lichts hat keinen Einfluß auf die Elektronenenergie
6. Extrapolation der Geraden liefert die **Austrittsarbeit W_{aus}** (diese Energie ist nötig um Elektronen aus der Zinkplatten herauszulösen)
7. Erklärung Einstein:
Licht besteht aus Photonen der Energie
 $E = h \cdot f$
 $= h \cdot c / \lambda$
8. Die Konstante h kann aus diesem Experiment bestimmt werden.

$Y = m \cdot x - b$
 $E_{\text{el}} = h \cdot f - W_{\text{aus}}$

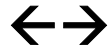
Photoeffekt - Zusammenfassung

- Durch Bestrahlung von Licht einer bestimmten Wellenlänge / Frequenz / Energie können Elektronen aus der Metalloberfläche herausgelöst werden.
- Das Licht muss eine bestimmte (materialabhängige) Mindestenergie (Grenzfrequenz, Grenzwellenlänge) haben um die nötige **Austrittsarbeit W_{aus}** zu aufzubringen
- Maximale kinetische Energie der herausgelösten Elektronen
 - $E_{\text{kin, max}} = \text{Photonenenergie } E_{\text{phot}} - \text{Austrittsarbeit } W_{\text{aus}}$**
 - $E_{\text{kin, max}} = E_{\text{phot}} - W_{\text{aus}} = h f_{\text{phot}} - W_{\text{aus}}$**
- Die Lichtintensität beeinflusst nur die Anzahl der freigesetzten Elektronen (Anodenstrom), hat aber **KEINEN** Einfluß auf die Energie der Elektronen
 ➔ **Widerspruch zur Wellentheorie, bzw.: Hinweise für Photonenbild**
- Schlußfolgerungen**
 - Licht besteht aus Energiequanten = Photonen**, die eine von der Lichtfrequenz f (oder ν) bzw. Wellenlänge ($\lambda = c/f$) abhängige **Energie $E_{\text{phot}} = h f_{\text{phot}}$** übertragen
 - Elektronen können durch Energiezufuhr aus einer Metalloberfläche herausgelöst werden, es ist hierfür eine **Mindestenergie** zuzuführen bzw. die **Austrittsarbeit W_{aus}** zu leisten
 - Für den Fall, dass $E_{\text{phot}} > W_{\text{aus}}$, wird die überschüssige Energie als kinetische Energie der Elektronen weitergegeben.
 - Die Lichtintensität entspricht der Anzahl „Photonen pro (Fläche * Zeiteinheit)“**



Etwas mehr über Photonen

Wellenbild



Teilchenbild

Elektromagnetische Strahlung



Photon

Photon wird gelegentlich auch Lichtquant oder Lichtteilchen genannt.

Das Photon ist ein sogenanntes Elementarteilchen, das „Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung“; es existiert nur in Bewegung und hat somit **keine Ruhemasse**

wohl aber **Energie und Impuls** (Impuls folgt aus Relativitätstheorie $E = m \cdot c^2$).

Energie: $E_{\text{Photon}} = h \cdot f_{\text{Welle}} = h \cdot c / \lambda_{\text{Welle}}$

Keine Ruhemasse: $m_{0,\text{Photon}} = 0$

Äquivalenz Masse-Energie: $E = m \cdot c^2$ (Einstein 1905)

Impuls p_{Photon} : aus $E = m \cdot c^2$ (Relativitätstheorie) und $E = h \cdot f_{\text{Welle}}$ (Planck, Photoeffekt)

→ $p = m \cdot v = h / \lambda$ (mit $v = c$ und $f = c / \lambda$)

→ $p_{\text{photon}} = h / \lambda = h \cdot f / c$

Rechnung zu Impuls des Photons

Impuls des Photons

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Relativitätstheorie $E = mc^2$

Impuls mit $v = c$

$$p = m \cdot c = \frac{m \cdot c^2}{c} = \frac{E}{c}$$

$$= \frac{h \cdot \cancel{c}}{\cancel{\lambda} \cdot c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\boxed{p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h \cdot \nu}{c}}$$

Umrechnungen „Größen aus Wellenbild / Energie von Photonen“

- **Beispiel: Licht eines HeNe Lasers mit Wellenlänge $\lambda = 633 \text{ nm}$**

- **Lichtfrequenz: $f = c / \lambda$** mit $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
 $f = (2,998 \cdot 10^8 / 633 \cdot 10^{-9}) \text{ ms}^{-1} \text{m}^{-1} = 4,73 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

- **Photonen Energie: $E = h \cdot f$** mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
 $E [\text{J}] = h \cdot f = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 4,73 \cdot 10^{14} \text{ J s s}^{-1} = 3,13 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

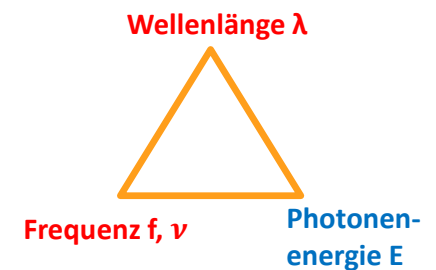
oder mit Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$$E [\text{eV}] = 3,13 \cdot 10^{-19} \text{ J} / 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 1,95 \text{ eV}$$

eV: oft genutzte Einheit in der Atom-/Quanten-/Laserphysik

Umrechnung:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \text{ oder } 1 \text{ J} = 1 / 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ eV} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$



$$P = U \cdot I = E/t$$

$$I = Q/t \text{ (Ladung/Zeit)}$$

Einheiten

$$[W = V \cdot A = \text{J/s}]$$

$$[V \cdot C/s = \text{J/s}]$$

$$[V \cdot C = \text{J}]$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ CV}$$

$$\text{Elektronladung} = e$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Herleitung zur Umrechnung J $\leftrightarrow$ eV

$$E = h \cdot f \text{ [Js*s}^{-1} = \text{J]} \quad (\text{mit } h = \text{Planck'schem Wirkungsquantum} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js})$$

E wird oft in der Einheit [eV] angegeben

Elektrische Leistung = Spannung * Strom

Elektrische Leistung = Energie(Arbeit)/Zeit

Strom = (bewegte)Ladung/Zeit

$$P = U \cdot I$$

$$P = E / t$$

$$I = Q / t$$



Einheiten

$$[\text{Watt} = \text{Volt} \cdot \text{Ampere} = \text{Joule/s}]$$

$$[\text{V} \cdot \text{Coulomb/s} = \text{Joule/s}] \rightarrow [\text{Volt} \cdot \text{Coulomb} = \text{Joule}]$$

$$P = I \cdot U = E/t \rightarrow E = I \cdot t \cdot U = Q \cdot U \rightarrow [J = A \cdot s \cdot V = C \cdot V]$$

$$[1J] = [1 CV]$$

$$\text{Ladung eines Elektrons: } e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Äußerer versus Innerer Photoeffekt

Der Photoeffekt, wie wir ihn bisher gesehen haben, wird auch **äußerer Photoeffekt** genannt.

Denn es werden ja Elektronen aus der Metall Kathode herausgelöst und dann außerhalb des Metalls nachgewiesen.

Innerer Photoeffekt:

Ein ähnlicher Prozess kann auch innerhalb eines geeigneten Materials (typischerweise Halbleiter) stattfinden:

- Elektronen werden hier nicht komplett herausgelöst, sondern werden von „gebundenen“ zu „freien“ Elektronen „im Leitungsband“ und können in Halbleitern als Photostrom nachgewiesen werden.. → das ist der **innere Photoeffekt**

Der Innere Photoeffekt ist der Grundprozess von lichtempfindlichen Bauelementen (Photowiderstand, Photodioden PD, Camera-Chips, ...)

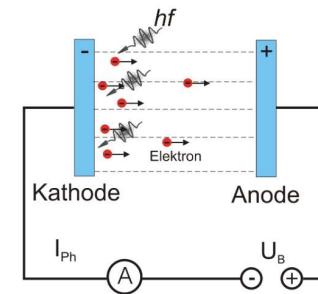


Abbildung 1: Bei Lichteinfall können Elektronen aus der Kathodenoberfläche herausgelöst werden. Sie werden von der Anode angezogen und im äußeren Stromkreis kann man den Photostrom mit der Stromstärke I_{Ph} messen.

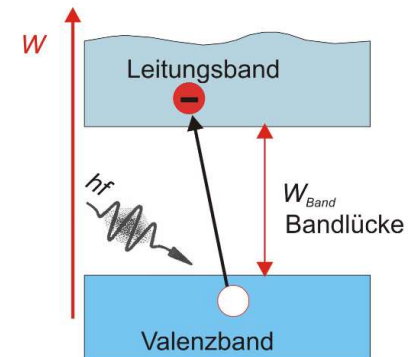
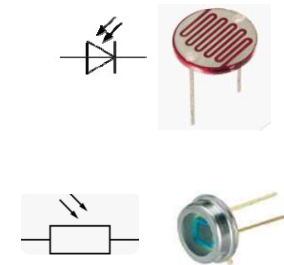
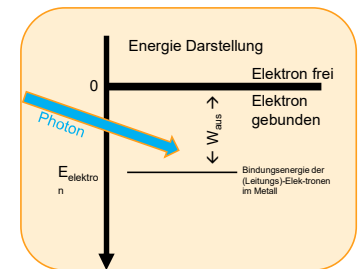


Abbildung 2: Photonen brechen Kristallbindungen auf und heben Elektronen ins Leitungsband

Quelle:

https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/fileadmin/praktikumphysik/Versuche/HF/D-Optik/D07_HF.pdf

Licht zeigt Wellen- und Teilcheneigenschaften

Gibt es auch Teilchen mit Welleneigenschaften?

Welle-Teilchen Dualismus

- Lichtwelle zeigt Teilcheneigenschaften
EM Welle $\leftrightarrow$ Photonen
- Teilchen (z.B. Elektron) zeigt Welleneigenschaften
Elektron $\leftrightarrow$ Elektronenwelle???

Wellenbild erklärt Interferenzmuster: z.B. Beugung am Spalt, Interferenz am Doppelspalt, Gitter...

➔ Young'sches Doppelspalt Experiment (Thomas Young 1802)

Denkmodell:

1. Eine ebene, monochromatische Lichtwelle trifft auf einen Doppelspalt (zwei Einzelspalte Breite = b in Distanz = d ,)
2. Jeder Spalt kann als Quelle einer neuen Teilwelle angesehen werden (Huygens'sches Prinzip)
3. Es ergibt sich ein Gangunterschied $\Delta s = \frac{d}{\sin \alpha}$
4. Wenn $\Delta s = n \cdot \lambda$, dann konstruktive Interferenz (Maximum), wenn $\Delta s = n \cdot \lambda/2$, dann Auslöschung (Minimum)
5. Auch von jedem Punkt in einem der Spalte geht ein Interferenzmuster aus
6. Für die Intensität läßt sich ableiten:

$$I(\alpha) = I_0 \cdot \underbrace{\left[\frac{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d \cdot \sin(\alpha)}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot d \cdot \sin(\alpha)}{\lambda}\right)} \right]^2}_{\text{Doppelspaltfunktion}} \cdot \underbrace{\left[\frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot b \cdot \sin(\alpha)}{\lambda}\right)}{\frac{\pi \cdot b \cdot \sin(\alpha)}{\lambda}} \right]^2}_{\text{Einzelspaltfunktion}}$$

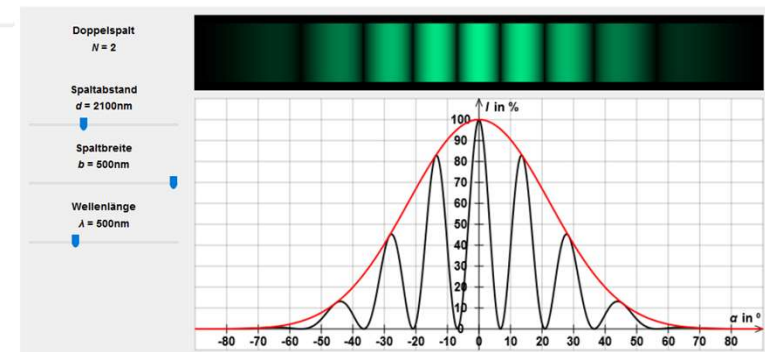
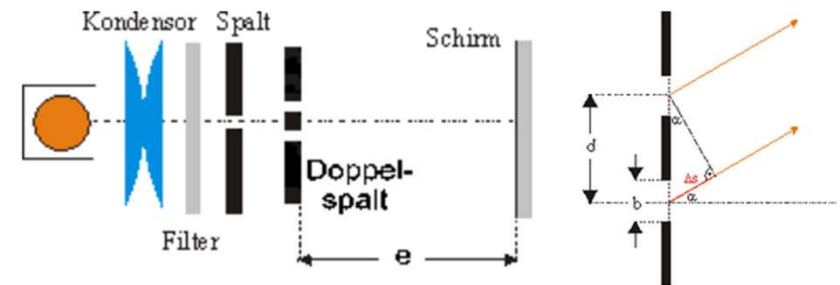


Abb. 2 Winkelabhängige Intensitätsverteilung hinter einem Doppelspalt sowohl als optisches Bild als auch als Diagramm. Der rote Graph zeigt die durch die endliche Ausdehnung der Einzelspalte bedingte Einhüllende.

<https://www.leifiphysik.de/optik/beugung-und-interferenz/grundwissen/doppelspalt>

Hier klicken um die Animation zu sehen

Interferenz lässt aus der Darstellung der elektromagnetischen Welle herleiten:

Wir überlagern zwei Lichtwellen $E_1(z, t)$ und $E_2(z, t)$:

Annahmen: Frequenz und Wellenzahl beider Wellen gleich

$$E_1(z, t) = E_0 * \cos(\omega t - k z)$$

$$E_2(z, t) = E_0 * \cos(\omega t - k z + \phi)$$

Es gilt das Superpositionsprinzip

(d.h. Wellen können überlagert/aufaddiert werden)

$$E_{\text{ges}}(z, t) = E_1(z, t) + E_2(z, t) = E_0 * [\cos(\omega t - k z) + \cos(\omega t - k z + \phi)]$$

$$= \dots \text{ Formelsammlung } \rightarrow \cos x + \cos y = 2 \cos \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}$$

$$= 2 * E_0 * \cos\left(\frac{2 * (\omega t - k z) + \phi}{2}\right) * \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

Interferenzterm

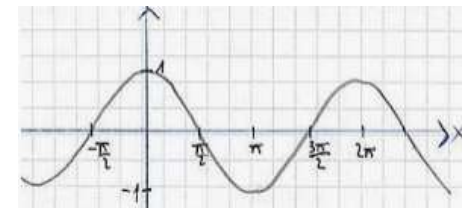
Auslöschung wenn $\cos\left(\frac{\phi}{2}\right) = 0$, d.h. wenn $\frac{\phi}{2} = \frac{\pm 1\pi}{2}, \frac{\pm 3\pi}{2}, \frac{\pm 5\pi}{2}, \dots$, bzw.

$\Delta z =$ ungradzahlige Vielfache von $\lambda/2$

Konstruktive Interferenz wenn $\cos\left(\frac{\phi}{2}\right) = 1$ oder -1 , d.h. $\frac{\phi}{2} = 0, \pm 1\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \dots$

$\Delta z =$ ganzzahlige Vielfache von λ

Mit $\phi = \frac{\Delta z}{\lambda} * 2 * \pi$, $\Delta z =$ Gangunterschied der beiden Wellen



Siehe auch Dohlus, Kap 5.2

Zum Vergleich mit Messungen:

Ausdruck für Licht Intensität mit $I \sim |E_{\text{ges}}|^2$ berechnen, z.B.

$$I(\alpha) = I_0 \cdot \cos^2\left(\frac{\pi \cdot d \cdot \sin(\alpha)}{\lambda}\right)$$

Rechnung zu Interferenz

Interferenz zweier Wellen E_1 und E_2

$$E_1(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$E_2(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t + \phi)$$

$$E_{\text{ges}} = E_1 + E_2$$

$$= E_0 \left[\cos(kx - \omega t) + \cos(kx - \omega t + \phi) \right]$$

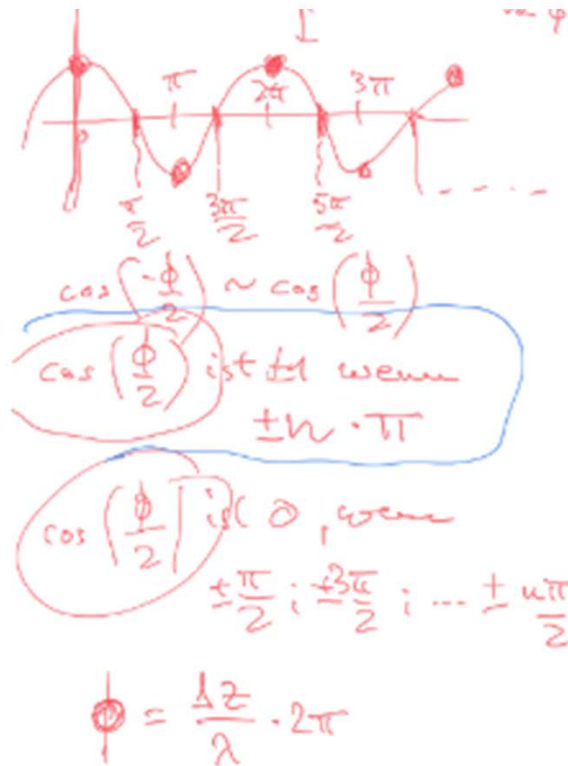
Mathematische Umformung

$$\cos x + \cos y = 2 \cos\left(\frac{x+y}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{x-y}{2}\right)$$

$$E_{\text{ges}} = E_0 \left[2 \cos\left(\frac{2kx - 2\omega t + \phi}{2}\right) \cdot \cos\left(-\frac{\phi}{2}\right) \right]$$

$$= 2E_0 \left[\cos\left(\frac{2kx - 2\omega t + \phi}{2}\right) \cdot \cos\left(-\frac{\phi}{2}\right) \right]$$

abhangig von ωt $\cos\left(-\frac{\phi}{2}\right)$ ist abhängig von ϕ



MAXIMA:

$$\frac{\phi}{2} = \pm n \cdot \pi = \frac{\Delta z}{\lambda} \cdot \frac{2\pi}{2}$$

$$\Delta z = \pm n \lambda$$

ist n ganzzahlige Vielfache von λ

MINIMA:

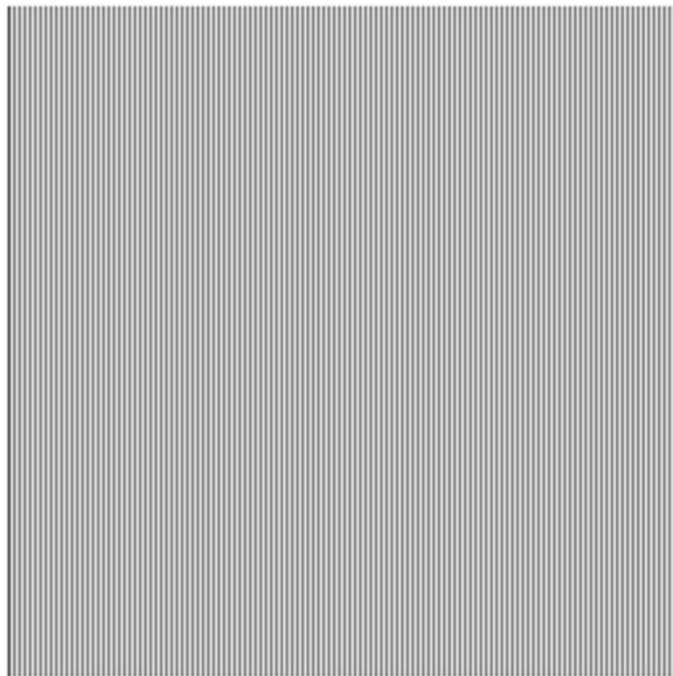
$$\frac{\phi}{2} = \pm (2n+1) \frac{\pi}{2} = \frac{\Delta z}{\lambda} \cdot \frac{2\pi}{2}$$

$$\Delta z = \pm (2n+1) \frac{\lambda}{2}$$

Δz ist ungerade Vielfache von $\lambda/2$

Beispiel: Bild und Beugungsbild eines Liniengitters

Bild und Beugungsbild eines Liniengitters



Liniengitter

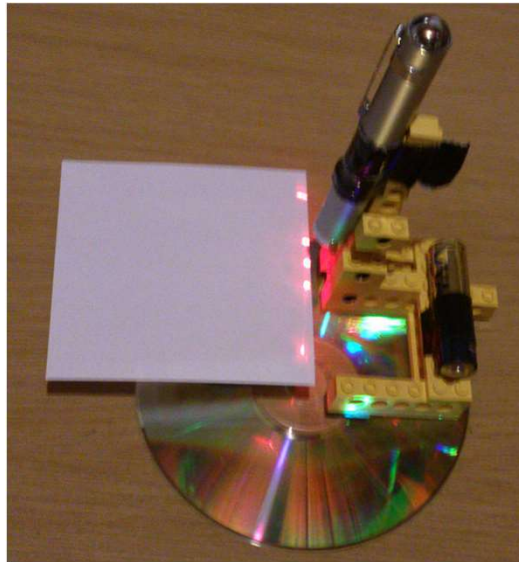


Beugungsbild eines Liniengitters

https://de.wikipedia.org/wiki/Optisches_Gitter

Beispiele: Beugungsbilder mit einer CD

Hauptreflex und
Beugungsmaxima eines
Laserpointers



Farbzerlegung von weißem
Licht durch Beugung



Farbzerlegung von weißem
Licht durch Beugung – hier
als Projektion



Spuren auf einer CD haben einen Abstand von ca. $1,6 \mu\text{m}$ und wirken für Licht im Bereich 400-800nm wie ein optisches Gitter

https://de.wikipedia.org/wiki/Optisches_Gitter

Licht zeigt Wellen- und Teilcheneigenschaften

Gibt es auch Teilchen mit Welleneigenschaften?

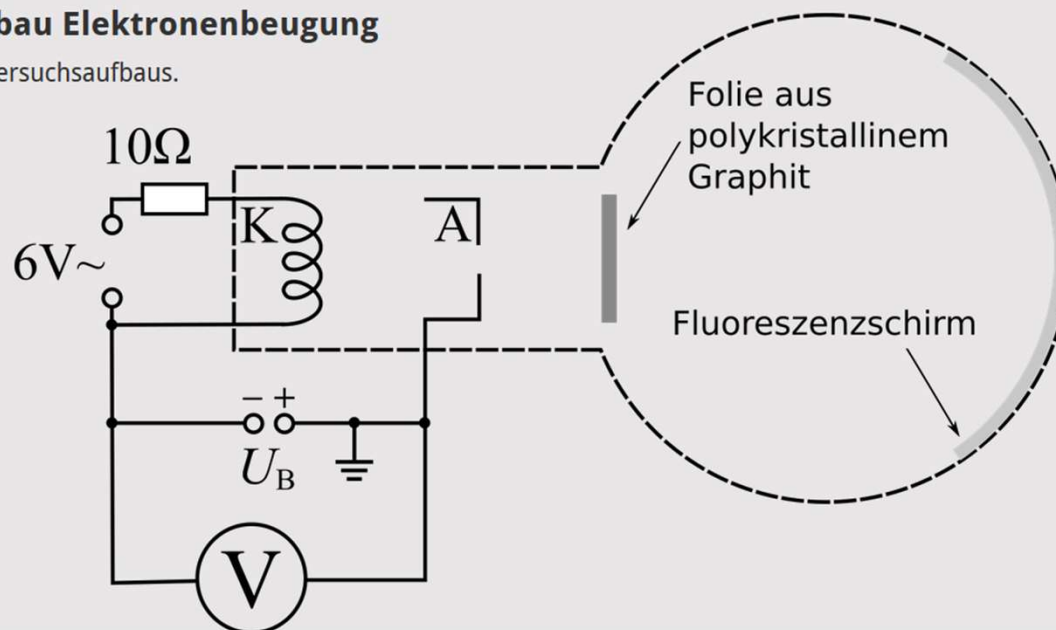
Welle-Teilchen Dualismus

- Lichtwelle zeigt Teilcheneigenschaften
EM Welle $\leftrightarrow$ Photonen
- Teilchen (z.B. Elektron) zeigt Welleneigenschaften
Elektron $\leftrightarrow$ Elektronenwelle???

Versuch Elektronenbeugung 1/5

Versuchsaufbau Elektronenbeugung

Schaltskizze des Versuchsaufbaus.



Quelle:

<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-elektron/versuche/elektronenbeugungsroehre>

Versuch Elektronenbeugung 3/5

Versuchsaufbau Elektronenbeugung

Elektronenbeugungsröhre mit
Elektronenkanone,
Fokussierungsanordnung,
Graphitfolie und Leuchtschirm



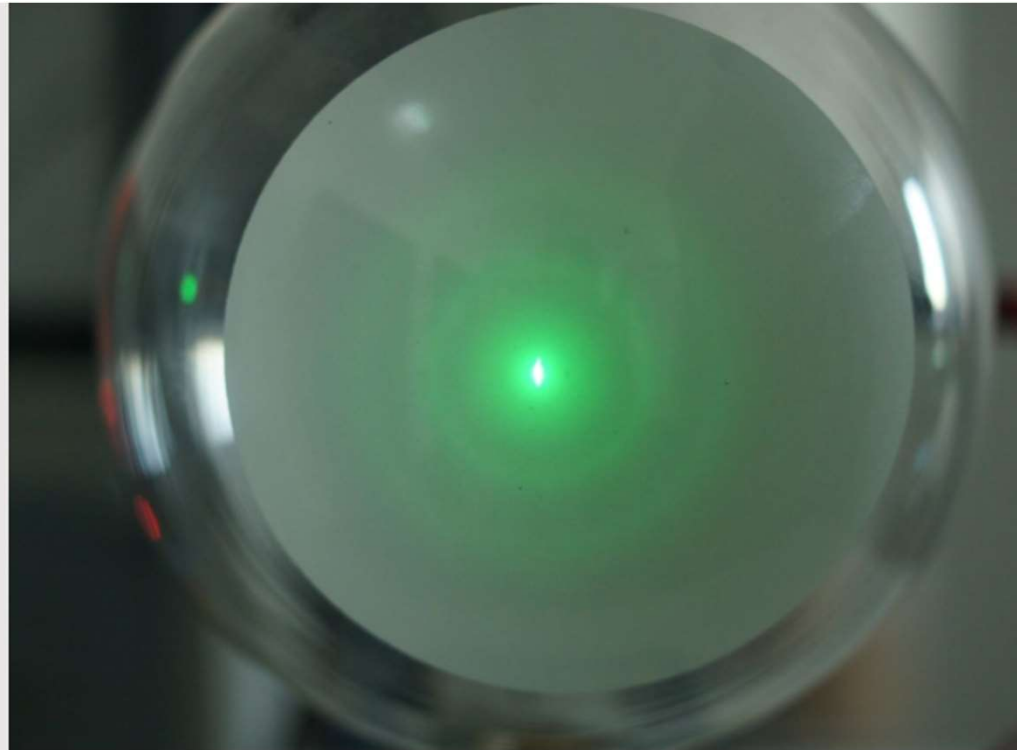
Quelle:

<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-elektron/versuche/elektronenbeugungsröhre>

Versuch Elektronenbeugung 4/5

Versuchsaufbau Elektronenbeugung

Leuchtschirm bei laufendem Versuch



Quelle:

<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-elektron/versuche/elektronenbeugungsroehre>

Versuch Elektronenbeugung 5/5

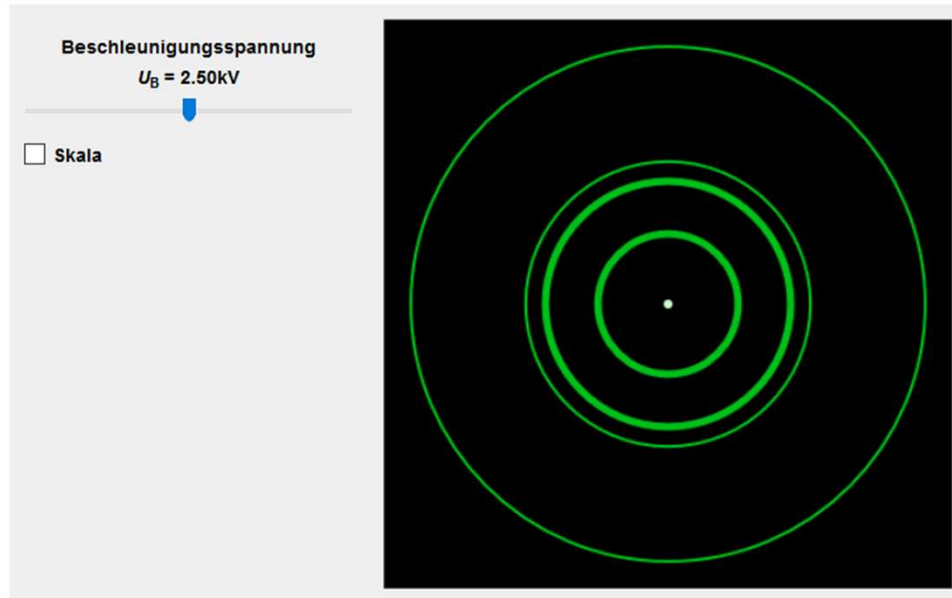
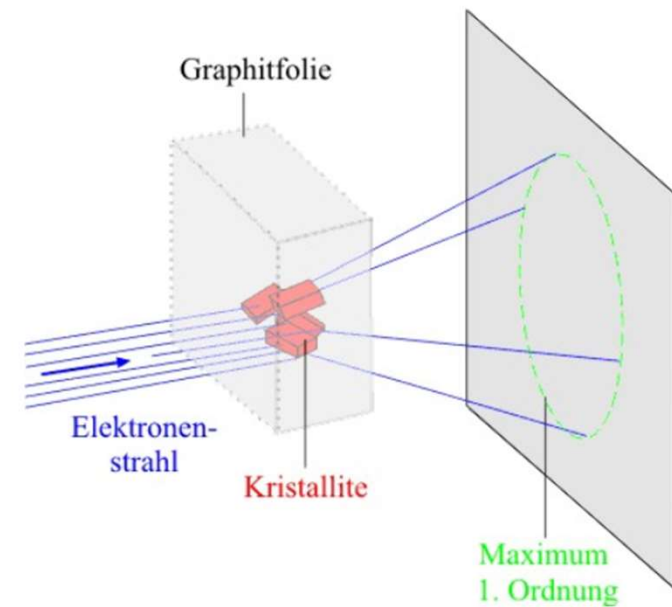


Abb. 4 Beugung von Elektronen an einer polykristallinen Graphitschicht mit den Netzebenenabständen $d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ und $d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$



Quelle:

<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-elektron/versuche/elektronenbeugungsroehre>

Louis-Victor de Broglie: Teilchen haben Wellencharakter und auch eine Wellenlänge (de Broglie Wellenlänge)

de Broglie:
$$p = \frac{h}{\lambda}$$

- Dissertation: 1924.

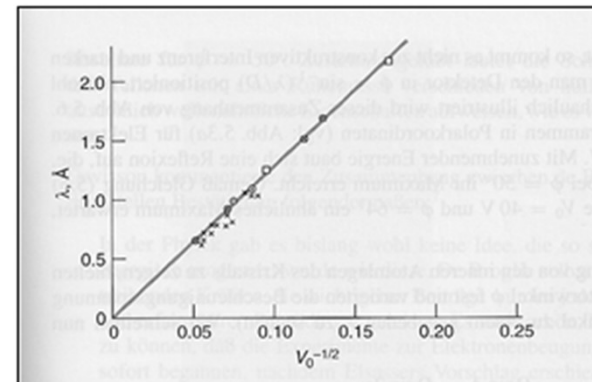
- Messungen von Davisson und Germer 1927 (Nobelpreis) s.u.

- 1929 de Broglie Nobelpreis.



Benutzt das Davisson-Germer Experiment um seine Hypothese zu bestätigen.

- Linearer Zusammenhang zwischen λ und dem Impuls der Elektronen



V_0 : Beschleunigungsspannung der Elektronen

$$E = e \cdot V_0 = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2 \cdot m}$$

$$p = \sqrt{2 m e V_0} = \sqrt{2 m e} \cdot \sqrt{V_0} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 m e}} \cdot V_0^{-\frac{1}{2}}$$

Beispiel: DeBroglie Welle eines Golfballs, $m = 50 \text{ g}$, $v = 20 \text{ m/s}$

DeBroglie Wellenlänge: $p = \frac{h}{\lambda_{DeBroglie}}$ bzw. $\lambda_{DeBroglie} = \frac{h}{p}$

Impuls $p = m v = 0,05 \cdot 20 \text{ kg m/s} = 1 \text{ kg m/s}$

$$\lambda_{DeBroglie} = \frac{h}{p} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{1} \left[\frac{\text{kg m}^2 \text{s s}}{\text{s}^2 \text{kg m}} \right] = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

→ Im täglichen Leben (mit Dimensionen im Bereich m, cm, mm) $b \gg \lambda$

→ keinerlei Welleneigenschaften des Golfballs sichtbar

Wann/Wie kann man Welleneigenschaften beobachten?

- Z.B. durch Interferenz bzw. Beugungsexperimente

• Wann tritt Beugung / Interferenz auf?

- Wir betrachten dazu die **Wellenlänge λ** in Relation zu den **Dimensionen b** eines „Hindernisses“:

- $b \gg \lambda$: Normaler Schattenwurf, keine Beugung/Interferenz beobachtbar
- **$b \approx \lambda$: Beugung**
- $b \ll \lambda$: Elementarwelle entsteht, bei mehreren Hindernissen dann ggf. Interferenz beobachtbar

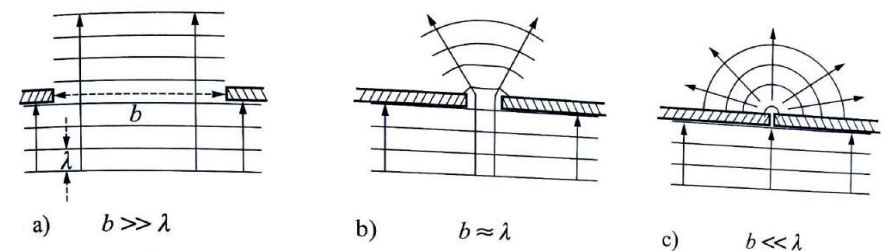


Abb. 13.32 Beugung von Wasserwellen am Einzelspalt

Man muss drei Fälle unterscheiden je nach der Breite des Spaltes im Vergleich zur Wellenlänge λ .

$b \gg \lambda$ Bei sehr breitem Spalt ändert sich die Ausbreitungsrichtung der Welle beim Durchtritt durch den Spalt nicht. Dieses Verhalten entspricht dem **normalen Schattenwurf** bei Licht.

$b \approx \lambda$ Bei Spaltbreiten in der Größenordnung der Wellenlänge wird die Ausbreitungsrichtung der Welle in den „Schattenbereich“ hinein abgebogen. Diesen Effekt bezeichnet man als **Beugung**.

$b \ll \lambda$ Bei sehr schmalen Spalt] füllt die gebeugte Welle den gesamten Raum hinter dem Hindernis aus. Sie bildet eine **Kreiswelle**, die **Elementarwelle** genannt wird. Die Elementarwelle scheint von einem Punktsender im Spalt auszugehen, der mit der Frequenz und der Phase der einlaufenden Welle schwingt. Er wird **Elementarsender** genannt.

Pitka, Bohrmann, et.al., Physik – Der Grundkurs, 5-Auflage, 2013, Verlag Europa Lehrmittel, ISBN 978-3-8085-5621-4

Elektronenbeugung zeigt: Elektronen haben Welleneigenschaften

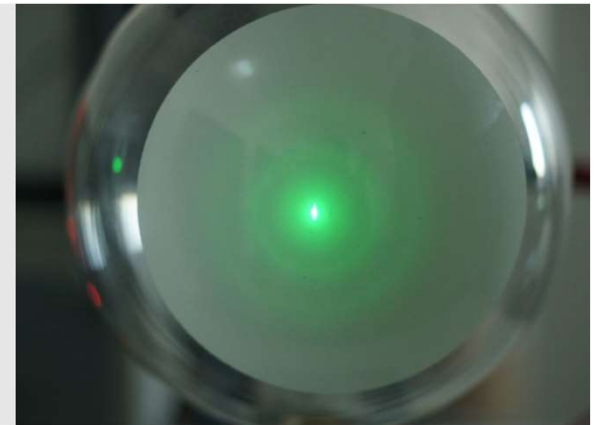
Wie sind die dazu Verhältnisse in der Elektronenbeugungsröhre?

Elektronen werden durch Spannung $U_B \sim 1 \text{ kV}$ beschleunigt und treffen auf Graphit Folie

- $E_{kin} = e U_B = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{p^2}{2m}$
- DeBroglie: $p = \frac{h}{\lambda_{DeBroglie}}$
- $e U_B = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda_{DeBroglie}^2}$
- $\lambda_{DeBroglie} = \frac{h}{\sqrt{2 m_e e U_B}} \sim 0,4 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
- Gitterkonstanten Graphit:
 $d_1 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, $d_2 = 2,14 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

Versuchsaufbau
Elektronenbeugung

Leuchtschirm bei laufendem Versuch



Fazit: Bedingung $b \approx \lambda$ ist erfüllt

D.h. Beugungsringe sind durch die DeBroglie Wellenlänge $\lambda_{DeBroglie}$ erklärbar.

Was haben wir bis jetzt in unserem Baukasten?

- Klassische Physik / Elektrodynamik → Licht als elektromagnetische Welle
 - $E_x(z, t) = E_0 \cos(kz - \omega t + \varphi)$
 - Erklärt: Brechung, Interferenz, Beugung, Polarisation, ...
- Teilchencharakter von Licht – Photonenbild
 - $E_{\text{photon}} = h * f_{\text{Welle}}$
 - $M_{\text{photon}} = 0$ (Ruhemasse)
 - $p_{\text{photon}} = h / \lambda = h * f / c$
 - Erklärt: Spektrum des Hohlraumstrahlers, Photoeffekt
- Wellencharakter von Teilchen (z.B. Elektronen)
 - $\lambda_{\text{De Broglie}} = h / p \leftarrow$ DeBroglie Wellenlänge eines Teilchens mit Impuls p
 - Erklärt: Elektronenbeugung an Kristallgittern

Mit diesen Tools mehr Verständnis von Aufbau und Verhalten von Atomen (und im Prinzip auch Molekülen sowie Festkörpern) erlangen

5.) Die Grenzwellenlänge des Photoeffekts für Silber liegt bei 262 nm.

a) Berechnen Sie die Austrittsarbeit für Silber.

b) Berechnen Sie die maximale Bremsspannung für einfallende Strahlung der Wellenlänge 175 nm.

[Lösung: 4,74 eV ; 2,36 V] ++

6.) Können Photoelektronen aus einer Kupferoberfläche, deren Austrittsarbeit 4,4 eV beträgt, emittiert werden, wenn sie mit sichtbaren Licht bestrahlt wird?

[Lösung: -] (++)

11.) Wie viele Photonen werden in einer Sekunde von einer gelben Lampe (Wellenlänge = 600 nm) von 10 W Leistung emittiert?

[Lösung: $3 \cdot 10^{19}$] (+)

0.1) Mit welcher Frequenz schwingt das E-Feld folgender elektromagnetischer Wellen im Vakuum?

- a. Lichtwelle eines Lasers der Wellenlänge = 600 nm
 - b. Lichtwelle UV-Licht der Wellenlänge = 300 nm
 - c. Radiowelle der Wellenlänge = 50 m
 - d. Gamma-Strahlung Wellenlänge = der 10^{-12} m
- (++)

0.6) Der Helium-Neon-Laser liefert Laserlicht der Wellenlänge $\lambda = 632,8$ nm.

- a) Bestimmen Sie die zugehörige Lichtfrequenz.
- b) Durch den Effekt der „Dopplerverbreiterung“ (dazu später mehr) ergibt sich eine Linienbreite von $\Delta f \sim 1,5$ GHz.
- c) Was bedeutet dieses (in %) in Relation zur Grundfrequenz?
- d) Welchem $\Delta \lambda$ würde das entsprechen?

(++)

Übungen

0.2) Wieviel % der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit erreicht die Ausbreitungs-geschwindigkeit eines Lichtstrahls in einem Glaswürfel mit dem Brechungsindex $n = 1,5$?

- a. Lichtgeschwindigkeit in Glas?
- b. Wie ist die zugehörige Permittivitätszahl ϵ_r ?

(++)

0.3) Zeigen Sie, dass Zahlen und Einheiten in der Formel

$$c_{\text{vakuum}} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s stimmen.}$$

($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As V}^{-1}\text{m}^{-1}$; $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ N A}^{-2}$)

(+)

0.4) Checken Sie Einheit für die Intensität I in der Formel $I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$

Mit $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ und $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As V}^{-1}\text{m}^{-1}$

Tipp: Einheit von E_0 ? Denken Sie an den Plattenkondensator

(+)

0.5) Wie groß ist die elektrische Feldstärke eines Laserstrahls mit der Leistung $P = 10 \text{ mW}$ und einer Fokusfläche von $a = 5 \text{ mm}^2$?

(mit $I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$; $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ und $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As V}^{-1}\text{m}^{-1}$)

(+)