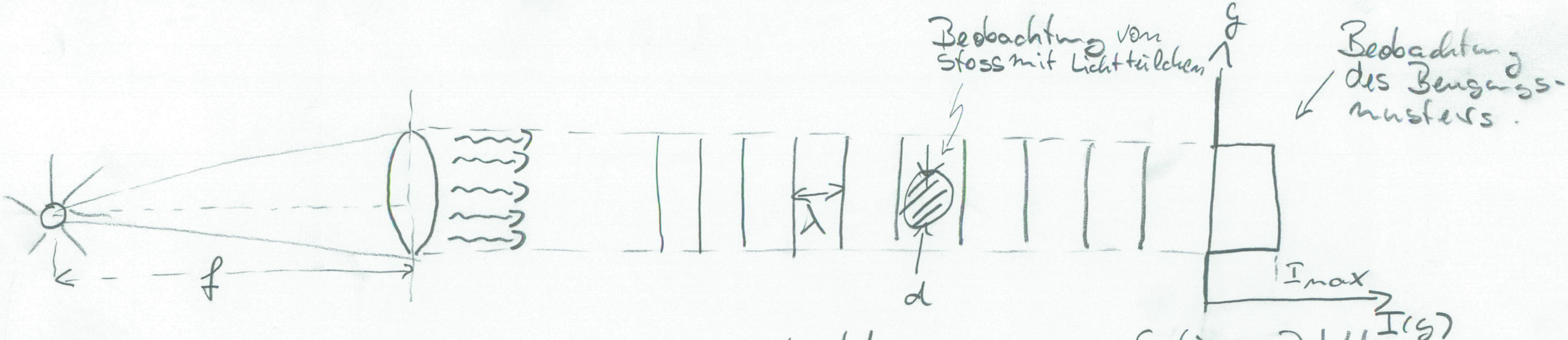
Typischer Aufbau zur Untersuchung der Eigenschaften von Licht



Quelle

λ : Wellenlänge

ν : Frequenz

P : Leistung

$I = \frac{P}{A}$: Intensität

Linse

f : Brennweite

Objekt:

d : Grösse

m : Masse

$p = m v$: Impuls

Schirm, Detektor

y : Koordinate

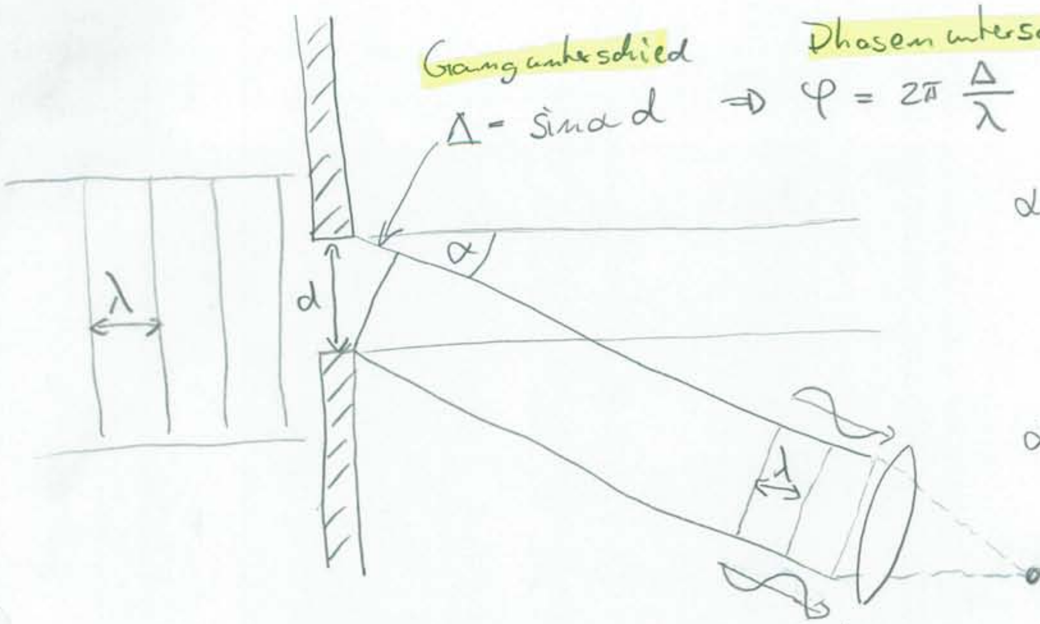
$I(y)$: Intensität

Verschiedene Fälle:

1. $d \gg \lambda$, m gross : Schattenwurf
2. $d \sim \lambda$, m gross : Beugung
3. $d \ll \lambda$, m klein : Lichtteilchen stößt mit Objekt : - Fotoeffekt
   - Comptoneffekt

Beugung am Spalt:

Gangunterschied $\Delta = \sin\alpha\, d$ $\Rightarrow$ Phasenunterschied $\varphi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}$



$\alpha = 0 \Rightarrow \varphi = 0$
$\Rightarrow$ Konstruktive Interferenz der Teilstrahlen

$\alpha \neq 0 \Rightarrow \varphi$ variiert über die Teilstrahlen
$\Rightarrow$ destruktive Interferenz

λ: Wellenlänge des Lichts
d: Spaltbreite
α: Beugungswinkel
Δ: Gangunterschied

Demonstrationsexperiment: Beugung am Spalt.

Eine ebene elektromagnetische Welle fällt auf ein Spalt. Die Wellenlänge λ des Lichts sei ähnlich der Breite d des Spalts.
Unter dem Beugungswinkel α ergibt sich ein Gangunterschied

$$\Delta = \sin\alpha\, d$$

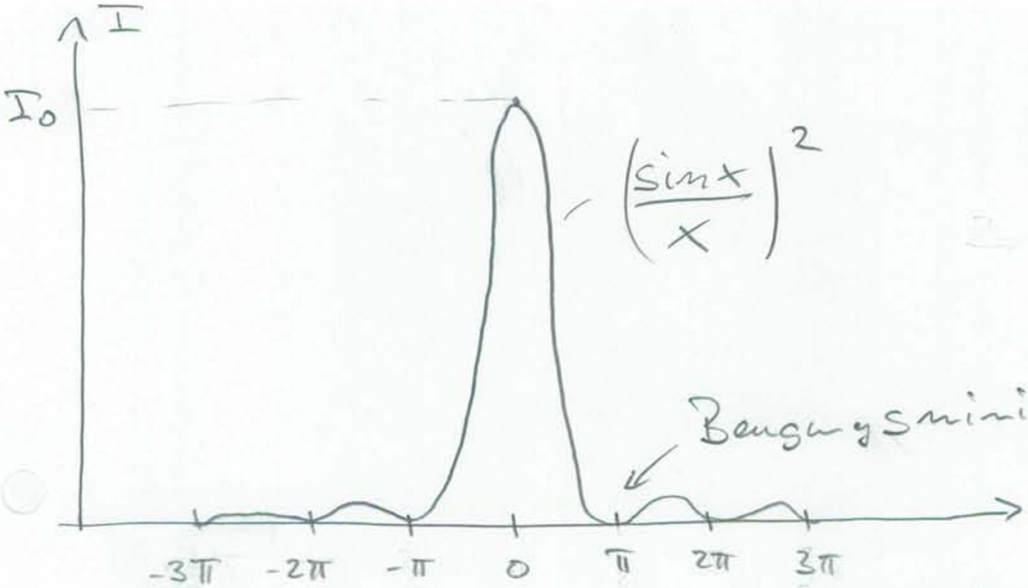
zwischen den Rändern des gebeugten Strahls. Beträgt dieser Gangunterschied ein vielfaches der Wellenlänge $\Delta = n\lambda$, und wird der Strahl durch eine Linse auf einen Punkt abgebildet so liegt unter dem Winkel

$$\sin\alpha_{min} = \frac{n\lambda}{d}$$

ein Minimum der gebeugten Intensität der Welle vor.

- Am Spalt gilt für die Intensitätsverteilung:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 \quad \text{mit} \quad x = \frac{\pi d}{\lambda} \sin\alpha$$



$$x = \frac{\pi d}{\lambda} \sin\alpha$$

Berechnung der Intensitätsverteilung erfolgt in der Übung.

- Minima treten auf bei $x_{min} = m\pi$

$$\Rightarrow \quad \sin\alpha_{min} = \frac{m\lambda}{d}$$

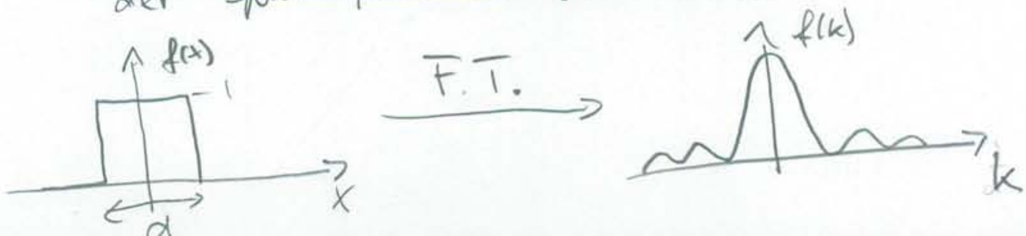
Siehe auch Berechnung mit Mathematica.

- Beispiel

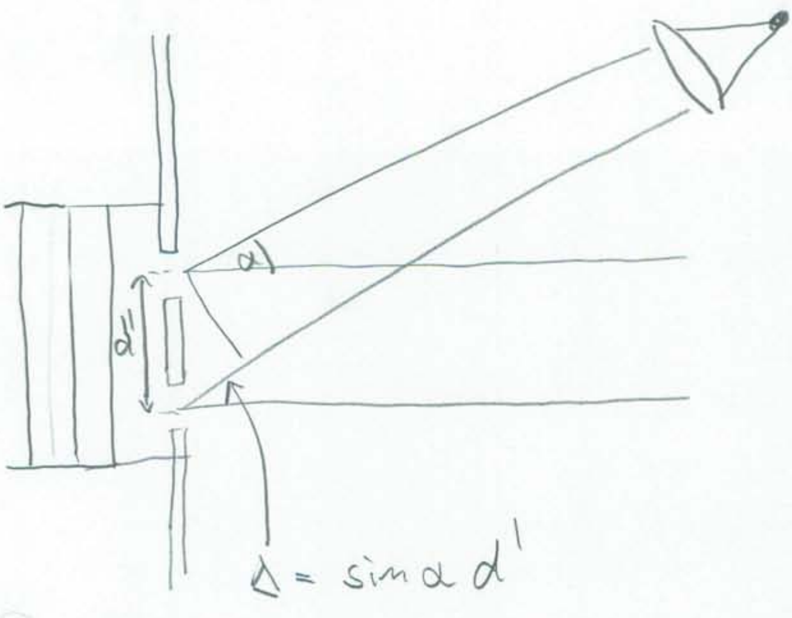
$$\left.\begin{array}{l} d = 1\,\text{mm} \\ \lambda = 600\,\text{nm} \end{array}\right\} \quad \alpha_{min} \sim \frac{\lambda}{d} = 0.6\,\text{mrad} \sim 2' = 0.03^\circ$$

$\Rightarrow$ sehr kleine Beugungswinkel für kleine λ/d!

<u>Bemerkung</u>: Das Beugungsmuster des Spaltes lässt sich durch Fourier-Transformation der Spaltfunktion berechnen.



Ähnlich: Interferenz am Doppelspalt



Siehe auch berechnete Intensitäts-Verteilung im Mathematica Notebook.

Die zwei Teilstrahlen interferieren konstruktiv oder destruktiv, je nach Gangunterschied Δ

- $$\sin\alpha_{max} = \frac{n\lambda}{d'} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

  konstruktiv für ganzzahligen Gangunterschied

- $$\sin\alpha_{min} = \frac{(2n+1)\lambda}{2d'} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

  destruktiv für halbzahligen Gangunterschied

$\Rightarrow$ Intensitätsverteilung wird im Übung berechnet.

$\Rightarrow$ Überlagerung der Beugung am Einzelspalt mit der Interferenz der zwei Teilstrahlen.

$$I = I_0 \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 (\cos z)^2 \quad \text{mit} \quad z = \frac{\pi d'}{\lambda}\sin\alpha$$

$$x = \frac{\pi d}{\lambda}\sin\alpha$$

- Beugung und Interferenz demonstrieren die Welleneigenschaften von Licht.

- Später werden wir ähnliche Phänomene bei Teilchen (z.B. Elektronen, Atomen, etc.) kennenlernen. Dann zeigen Materiewellen Beugung und Interferenz am Spalt bzw. am Doppelspalt.

Teilcheneigenschaften von Licht

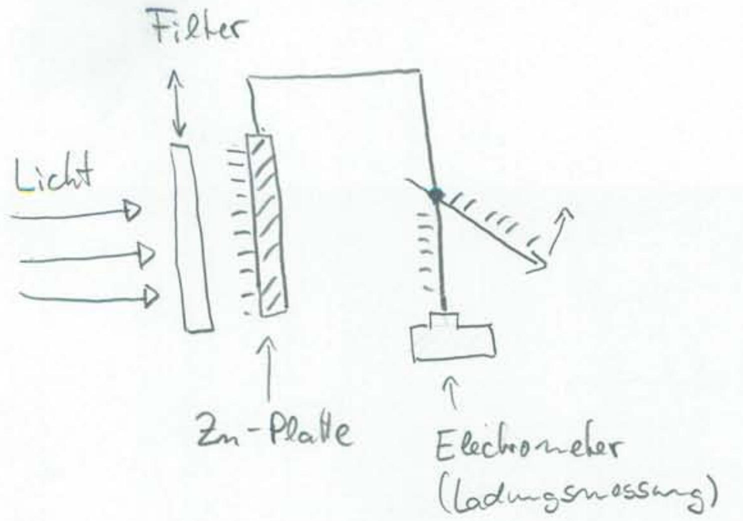
- Beim sog. Fotoeffekt können einzelne Lichtteilchen (Photonen) einzelne Elektronen aus der Oberfläche eines Metalls auslösen.

- Erklärung nach Einstein (Nobelpreis 1921): Die von einer elektromagnetischen Welle transportierte Gesamtenergie E ist in Form von Lichtteilchen (Photonen) die die Energie $\delta E = h\nu$ tragen quatisiert.

  h: Planck-konstante

  ν: Frequenz

Demonstrationsexperiment: Fotoeffekt



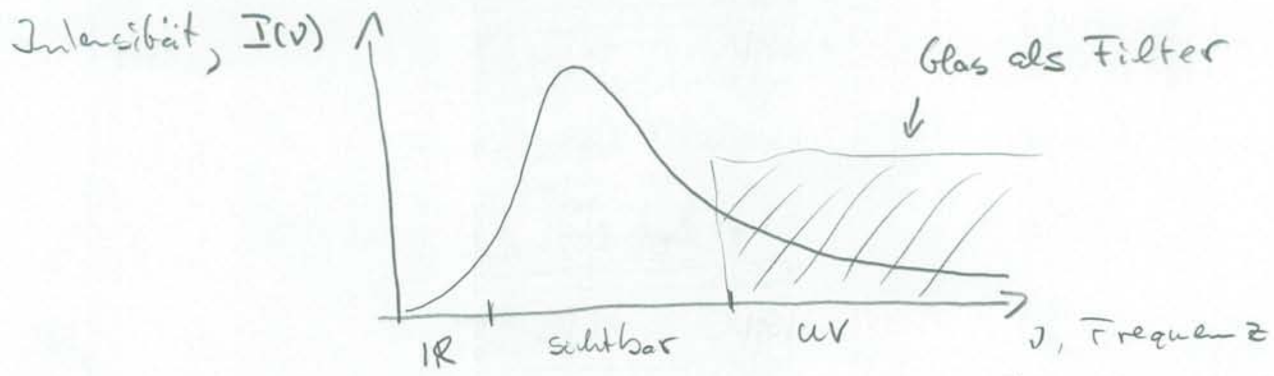
Frage:
- Was passiert wenn Licht auf das geladene Metall trifft?
- Was ist der Effekt der Glasscheibe?

Beobachtung:

- Keine Entladung einer positiv aufgeladenen Platte
- Entladung bei negativ aufgeladener Platte
  - Entladung stoppt bei Verwendung einer Glasplatte als Filter
  - Entladung bei Verwendung einer Quarzglasplatte als Filter

Erklärung:

- Negative Ladung wird durch Wechselwirkung mit ausreichend hochfrequentem Licht von Platte entfernt



- Spektrum der Bogenlampe ist kontinuierlich
  - ⇒ wie Sonne
  - ⇒ Spektrum des schwarzen Strahlers wird berechnet

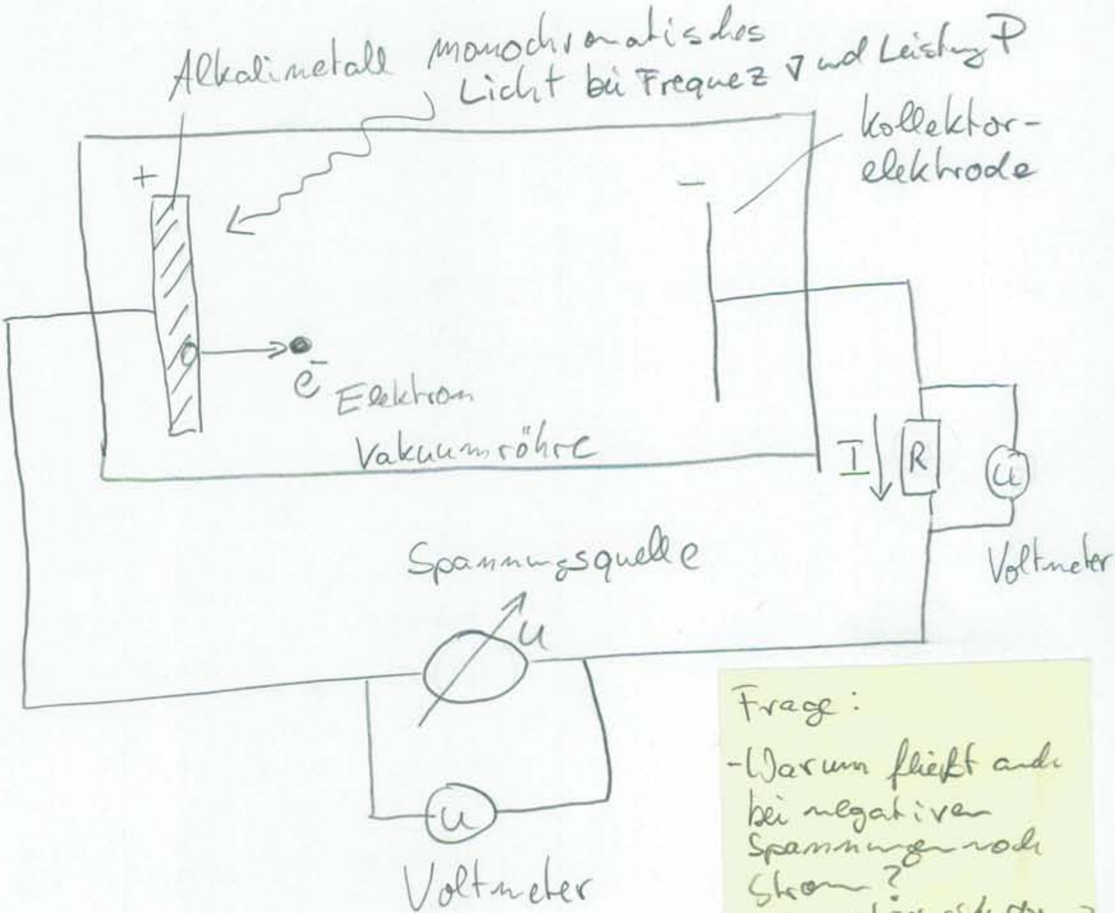
Der Photoeffekt

- liefert Hinweis auf die Quatisierung der Energie von elektromagnetischen Wellen

- Beobachtung: Licht, das auf eine Metalloberfläche fällt, löst dabei instantan Elektronen aus.

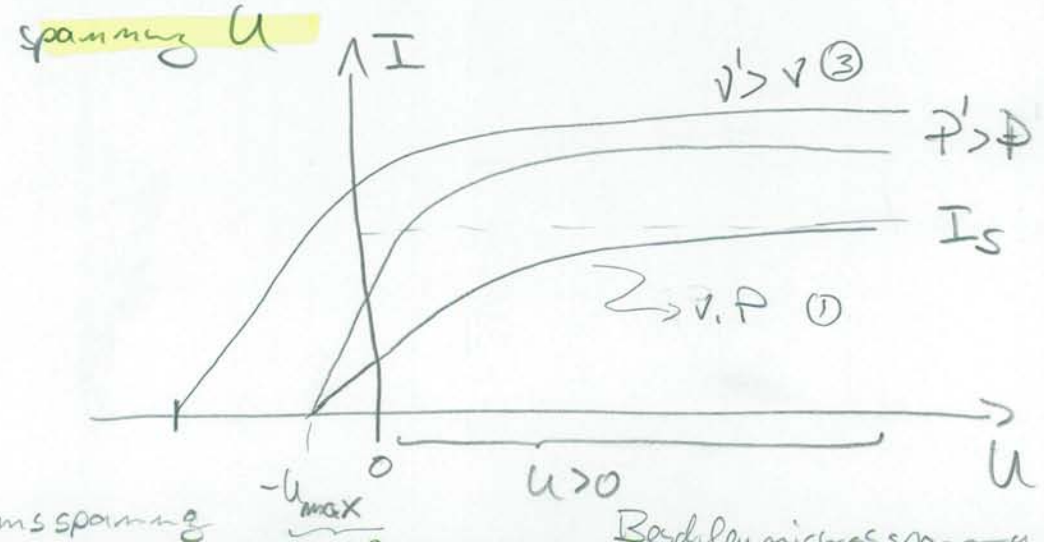
Aufbau zur quantitativen Messung des Fotoeffekts.

detaillierte Untersuchung des Effekts im Vakuumröhre



Frage:
- Warum fließt auch bei negativen Spannungen noch Strom?
- Wie verhält sich der Photostrom bei $P' > P$?

- Abhängigkeit des gemessenen Photostroms I von der Beschleunigungsspannung U



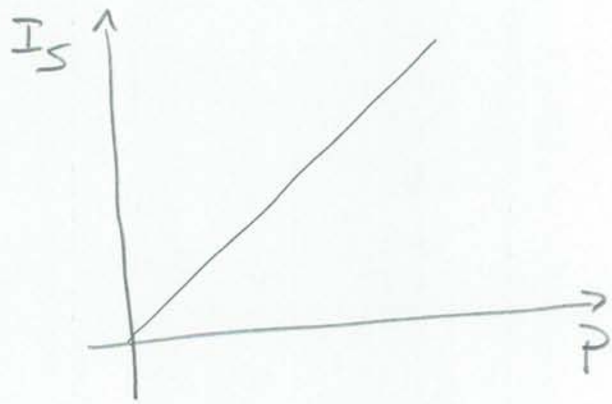
Beobachtungen:

- Strom sättigt bei großen Spannungen $I = I_S$
- Strom geht erst bei negativen Spannungen auf $I(-U_{max}) = 0$ zurück

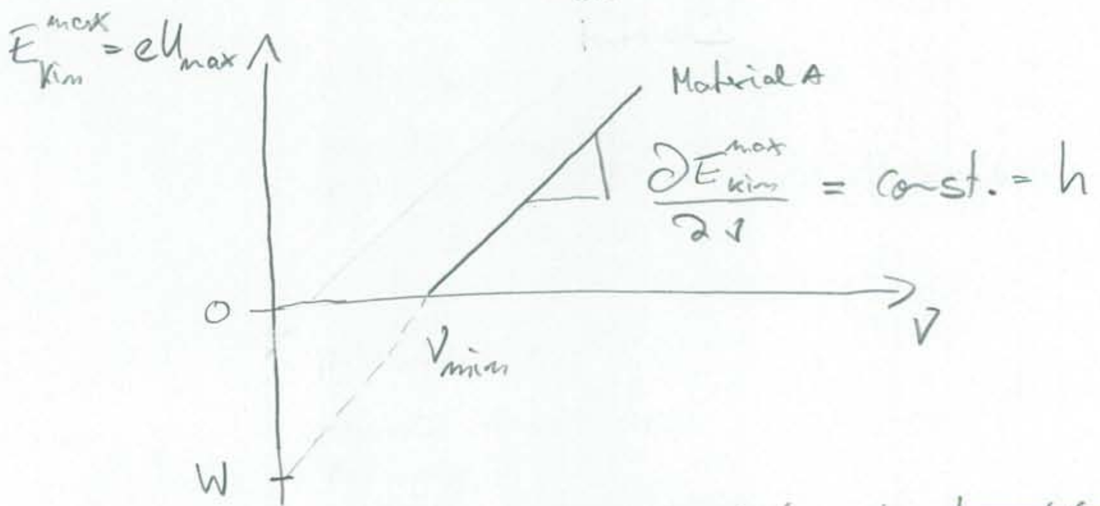
  $\Rightarrow$ e^- besitzen kinetische Energie

  $$E_{kin}^{max} = -e(-U_{max}) = eU_{max}$$

- Sättigungsstrom I_S ist proportional zur Leistung P des eingestrahlten Lichts



- Bei Erhöhung der Frequenz des Lichtes erhöht sich E_{kin}^{max} proportional zu ν



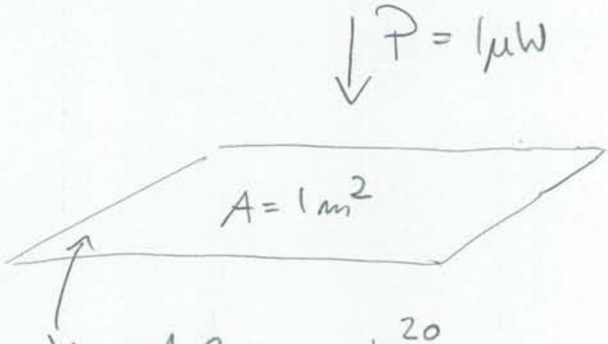
- Die Proportionalitätskonstante ist $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Js
- Es gibt eine minimale Frequenz ν_{min} unterhalb derer keine Elektronen ausgelöst werden
- W: Bindungsenergie der e^- im Metall

  $$W = h\nu_{min}$$

- Unterschiedliche Materialien haben unterschiedliche minimale Auslösefrequenzen ν_{min} aber dieselbe Frequenzabhängigkeit $\propto h$

- Elektronen werden quasi instantan ($\sim 10^{-9}$ s) nach Einschalten des Lichts ausgelöst, selbst bei sehr kleinen Lichtintensitäten ($P \sim 1\mu W$)

⇒ Versuch diesen Aspekt klassisch zu erklären: Berechne mittlere Energieaufnahme eines Elektrons an der Metalloberfläche.



Wie lange würde es dauern, bis im Mittel alle e^- aus der Oberfläche des Materials ausgelöst sind?

$$N = A\,\rho_\square = 10^{20}$$

Anzahl der Elektronen

$$\underbrace{\rho_\square \sim \left(10^{+10}\right)^2 \frac{1}{m^2}}_{}$$

Oberflächendichte vom e^-

($1 e^-$ pro Atom; Atomdurchmesser ~ 1 Å)

$$\frac{P}{N} = 10^{-26}\,W \approx 10^{-7}\,\frac{eV}{s}$$

$$\boxed{\Delta E = \frac{P}{N}\Delta t = 10^{-16}\,eV}$$

- mittlere Energieaufnahme eines e^- in 1 ms
- typische Bindungsenergie eines e^- im Metall

$W \sim 1 - 5\ eV$

klassische Modelle scheinen nicht gut zu funktionieren ⇐

⇒ 10^7 Sekunden bis alle e^- das Metall verlassen können

⇒ nur ein kleiner Teil der e^- absorbiert die gesamte Energie des Lichts

Einsteins Erklärung des Photoeffekts (1905)

- Licht besteht aus einzelnen Quanten, die die Energie

$$E = h\nu \quad \Rightarrow \text{Nobelpreis 1921}$$

tragen und Photonen genannt werden.

ν: Frequenz des Photons

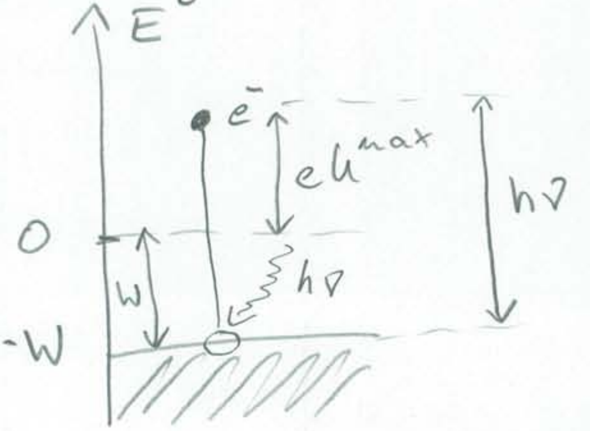
$h = 6.6 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Js}$: Planck'sche Konstante

- Ein einzelnes Photon kann seine gesamte Energie auf ein einzelnes e^- übertragen. Beim Austritt aus dem Metall wird das e^- die Bindungsenergie W überwinden und die restliche Energie als kinetische Energie aufnehmen

$$\boxed{h\nu = W + eU_{max}}$$

Energie des Photons — Austrittsarbeit — kinetische Energie des Elektrons

- Darstellung in einem Energieniveaudiagramm



Austrittsarbeiten bei versch. Metallen:

	W [eV]
Li	2.46
Na	2.28
K	2.25
Rb	2.13
Cu	4.48

Anschliessend: Frage zum Fotoeffekt mit einem einzelnen Elektron.