

Ziel:

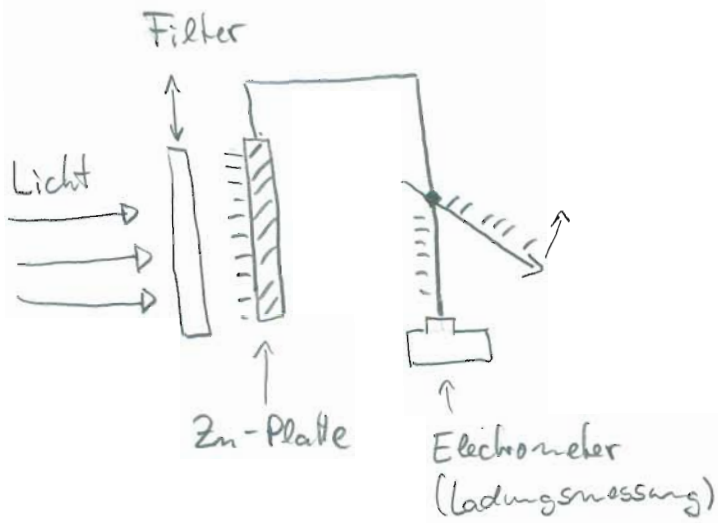
Erste Einführung der Teilchen eigenschafte  
von elektromagnetischer Strahlung (Licht)

- Klassische Welleneigenschaften sind bekannt:
  - Beugung
  - Interferenz
- Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen sind beschrieben durch Maxwell-Gleichungen

Neu:

- Licht verhält sich auch wie Teilchen
  - Energie einer <sup>em.</sup> Welle ist quantisiert in Form von Photonen der Energie  $E = h \nu$ 
    - $h$ : Wirkungsquantum, Planck
    - $\nu$ : Frequenz der Welle
  - ⇒ Fotoeffekt lieferte Anfang des 20. Jhd. erste Anhaltspunkte für diese Tatsache
    - ↳ Auslösen von einzelnen  $e^-$  aus Metall durch Stoß mit Photonen
    - ⇒ inverser Fotoeffekt
      - ↳ Erzeugung eines einzelnen Photons durch Abbremsen eines einzelnen Elektrons
      - ↳ Beobachtung von Beugung solcher Photonen an Kristallgittern
    - Das Photon besitzt Impuls  $\frac{h\nu}{c} = p$ 
      - ⇒ Compton-Effekt: Stoß Photon / freies  $e^-$   
↳ Energie & Impuls erhalten

# Demonstrations experiment: Fotoeffekt

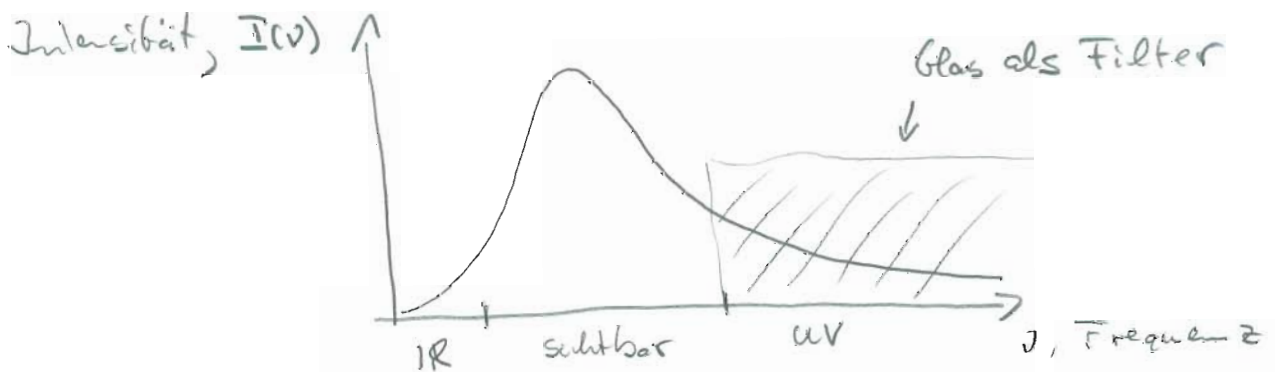


## Beobachtung:

- 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 hochfrequentem Licht von Platte entfernt



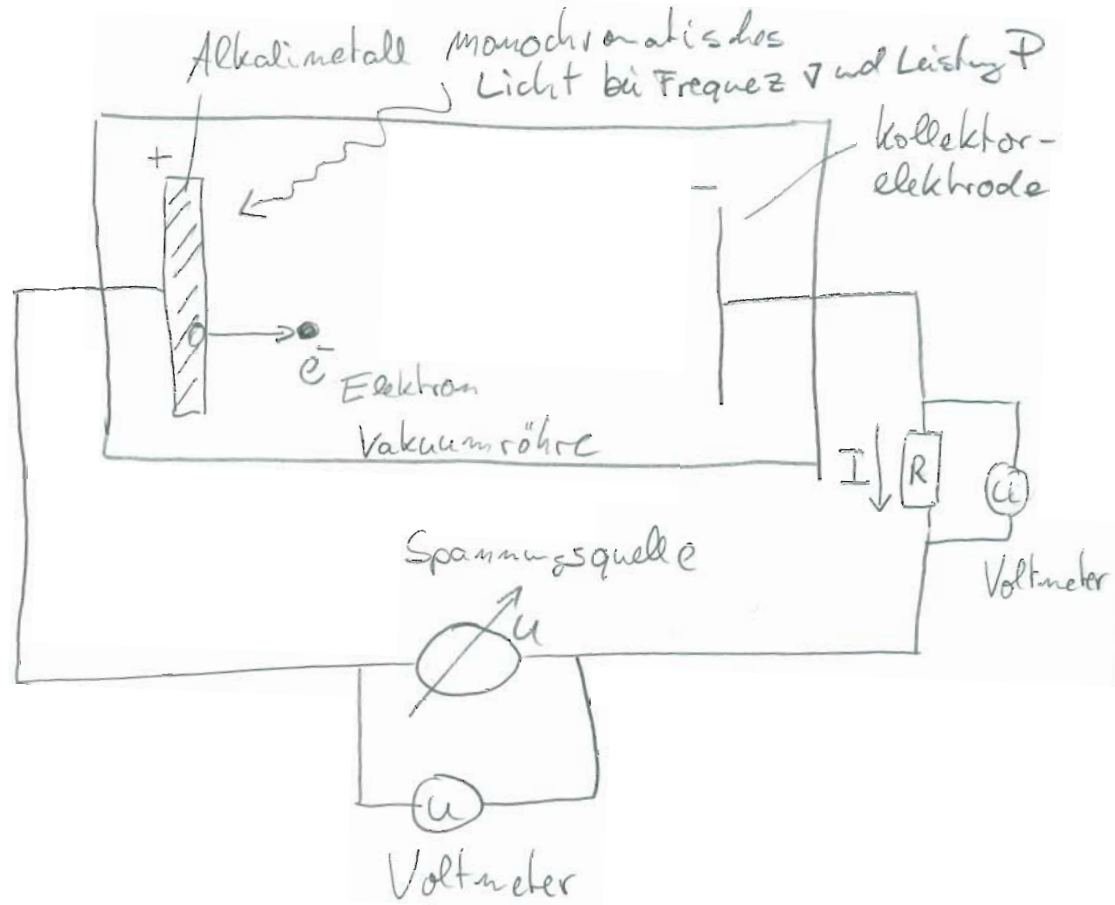
- Spektrum der Bogenlampe ist kontinuierlich
  - ↳ wie Sonne
  - ↳ Spektrum des schwarzen Stahlers wird berechnet

# Der Photoeffekt

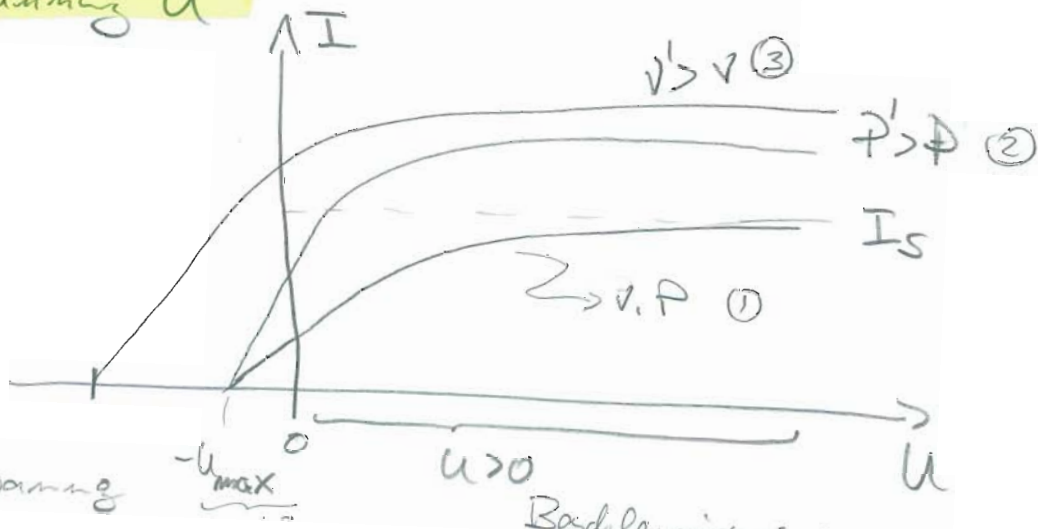
- liefert Hinweis auf die **Quantisierung der Energie** von elektromagnetischen Wellen
- Beobachtung: Licht, das auf eine Metalle Oberfläche fällt, löst dabei **instantan** Elektronen aus.

- Aufbau:

detailliertere Untersuchung des Effekts im Vakuumröhre



- Abhängigkeit des gemessenen **Photostroms I** von der **Beschleunigungsspannung U**



Bremsspannung  $-U_{max}$

Beschleunigungsspannung  $U > 0$

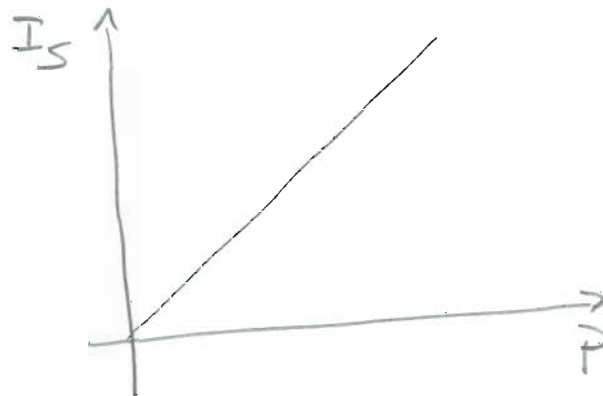
## Beobachtungen:

- Strom **sättigt** bei großer Spannung  $I = I_S$
- Strom geht erst bei **negativer Spannung** auf  $I(-U_{\max}) = 0$  zurück

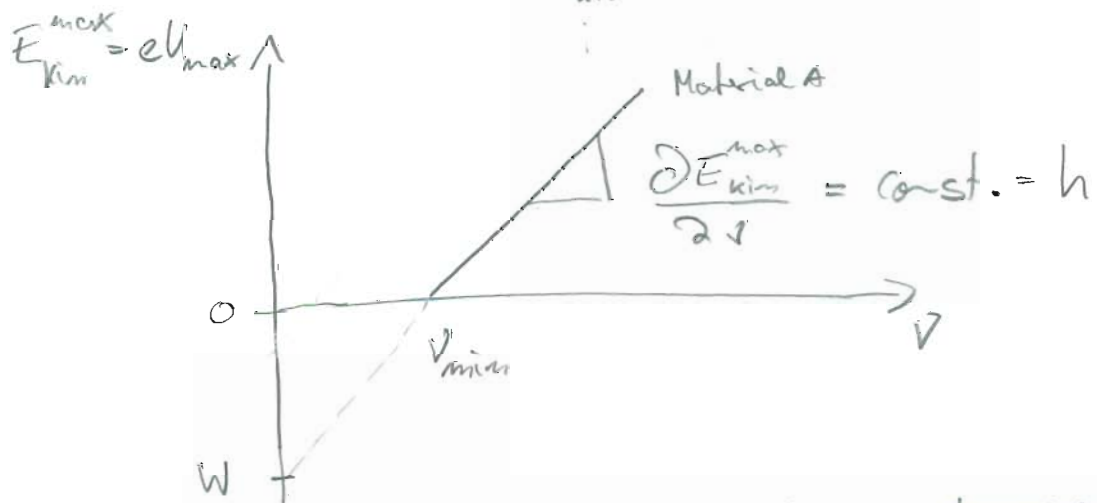
↳  $e^-$  besitzen **kinetische Energie**

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

- Sättigungsstrom  $I_S$  ist **proportional** zur Leistung  $P$  des einstrahlenden Lichts



- Bei Erhöhung der Frequenz des Lichtes erhöht sich  $E_{\text{kin}}^{\max}$  proportional zu  $\nu$



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

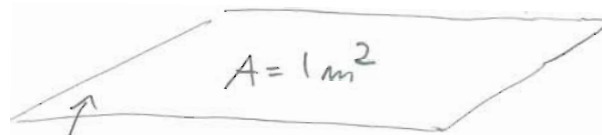
$$W = h \nu_{\min}$$

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

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

2  $\rightarrow$  Versuch diesen Aspekt klassisch zu erklären: Berechne mittlere **Energieaufnahme eines Elektrons** an der Metalloberfläche.

$$\downarrow P = 1 \mu\text{W}$$



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

Anzahl der Elektronen

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

Oberflächendichte von  $e^-$

( $1 e^-$  pro Atom; Atomdurchmesser  $\sim 1 \text{ \AA}$ )

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

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

- mittlere **Energieaufnahme eines  $e^-$  in 1 ns**

- typische **Bindungsenergie eines  $e^-$  im Metall**

$$W \sim 1 - 5 \text{ eV}$$

klassische Modelle scheinen nicht gut zu funktionieren  $\Leftarrow$

2  $\rightarrow$   $10^7$  Sekunden bis alle  $e^-$  das Metall verlassen können  
 2  $\rightarrow$  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

$$E = h\nu \quad \rightarrow \text{Nobelpreis 1906}$$

tragen und **Photonen** genannt werden.

$\nu$ : Frequenz des Photons

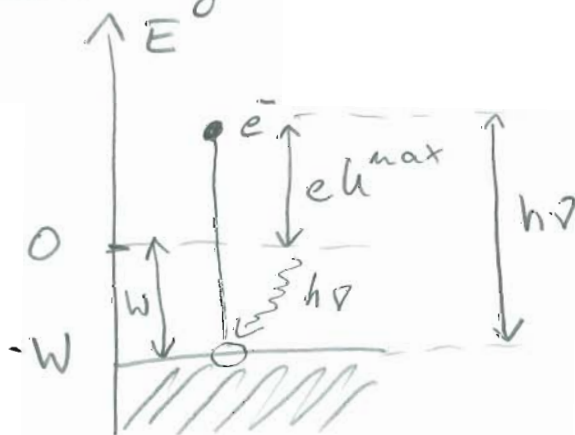
$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  : Planck'sche Konstante

- 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

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

Energie des Photons      Austrittsarbeit      Kinetische Energie des Elektrons

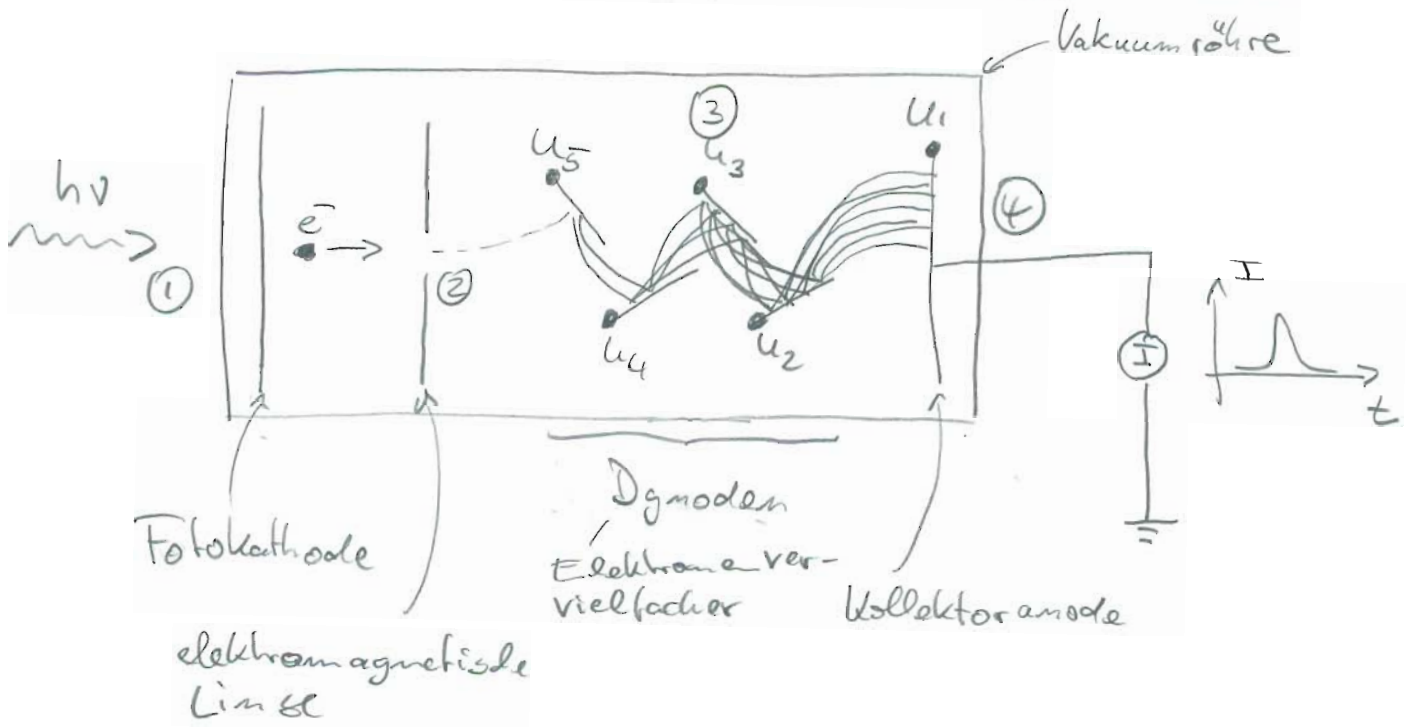
- Darstellung in einem Energieniveaudigramm



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

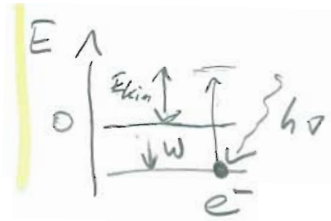
# Der Photomultiplier-Zähler: Detektion einzelner Photonen

①



## Funktionsweise:

① Photon erzeugt  $e^-$  durch **Fotoeffekt**



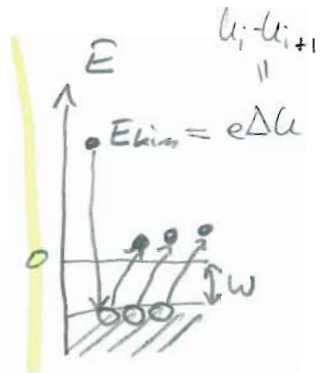
②  $e^-$  wird auf Dynoden fokussiert mit Elektronenlinse

③ positive Spannung  $U_5 > 0$  beschleunigt  $e^-$  auf  $E_{kin} = eU_5 \gg W$

$W$ : Austrittsarbeit der Dynode

↳ Erzeugung von **Sekundärelektronen**

↳ Kaskade von Dynoden mit  $U_1 > U_2 > U_3 > U_4 > U_5$  vervielfacht Elektronenzahl auf messbares Niveau



④ Auffangen der Sekundärelektronen in Kollektoranode und Messung des Strompulses erzeugt durch ein einzelnes Photon.

⇒ Anwendung: Photodetektoren, äquivalente Realisierung in Halbleiter elektronik